



TESIS-TM 142501

**PROSES AUSTEMPERING DALAM PEMBUATAN BAJA
TAHAN AUS BERSTRUKTUR BAINIT**

**FAISAL MANTA
NRP 2113201002**

**DOSEN PEMBIMBING
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



TESIS-TM 142501

**PROSES AUSTEMPERING DALAM PEMBUATAN BAJA
TAHAN AUS BERSTRUKTUR BAINIT**

FAISAL MANTA
NRP 2113201002

DOSEN PEMBIMBING
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



TESIS-TM 142501

AUSTEMPERING IN THE PROCESS OF WEAR RESISTANCE STEEL WITH BAINITE STRUCTURE

**FAISAL MANTA
NRP 2113201002**

**Advisor
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.**

**MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017**

**LEMBAR PENGESAHAN
TESIS**

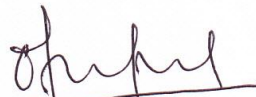
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Faisal Manta
NRP. 2113201002

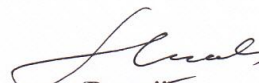
Tanggal Ujian: Senin, 24 Juli 2017
Periode Wisuda: Semester Genap 2016/2017

Disetujui oleh:

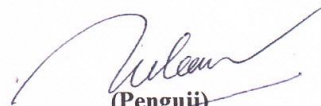
1. Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP: 198005202005011001


(Pembimbing)


2. Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc.
NIP: 195204171979031002


(Penguji)

3. Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA.
NIP: 196308151989032001



(Penguji)

4. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP: 197407032000031001


(Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri


Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 196905071995121001

PROSES AUSTEMPERING PADA PEMBUATAN BAJA TAHAN AUS BERSTRUKTUR BAINIT

Nama Mahasiswa : Faisal Manta

NRP : 2113201002

Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Material yang memiliki sifat ketahanan aus dan ketangguhan yang baik, sangat dibutuhkan pada sektor pertambangan dan konstruksi. Namun, bahan tersebut sulit untuk didapatkan pada pasar lokal di Indonesia, sehingga bahan tersebut harus diimpor dari luar negeri. Penelitian ini dilakukan untuk membuat baja tahan aus yang terbuat dari material lokal, dengan cara melakukan proses perlakuan panas. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan baja tahan aus yang terbuat dari bahan lokal agar memiliki karakteristik yang sama dengan baja tahan aus impor.

Material yang digunakan pada penelitian adalah baja hasil pengecoran dengan komposisi 0.65%C;2.01Si;1.84%Mn;1.27%Cr (0.6CCrMn2Si) dan 0.78%C; 1.66%Si; 1.89%Mn;1.24%Cr (0.8CCrMn1.6Si). Baja mengalami penempaan pada temperatur 700-900 °C dengan rasio tempa adalah 3, kemudian diannealing. Annealing dilakukan pada temperatur 1000°C selama 8 jam. Baja hasil annealing diberi perlakuan panas austempering dengan variasi temperatur 150, 200 dan 250°C dengan waktu austempering 160 dan 330 jam. Pada spesimen baja hasil austempering dilakukan observasi strukturmikro dengan mikroskop optik, uji kekerasan dengan *Rockwell-C*, uji kekuatan impak metode *Charpy* dan uji keausan metode *Ogoshi*.

Temperatur austempering 150 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si memiliki struktur *lower bainite*. Struktur *upper*, *lower bainite* dan austenit sisa pada temperatur austempering 200 dan 250 °C. Kekerasan pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C dan waktu tahan 160 jam meningkat hingga mencapai 52 HRC. Kekuatan impak pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 200 °C dan waktu tahan 330 jam adalah 1.4 Kp.m dan 1.6 Kp.m. Keausan pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si berkurang hingga mencapai kurang dari 0.1 mm³/mm dan 0.1 mm³/mm.

Kata kunci: *austempering, bainit, wear resistance material, wear test.*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

AUSTEMPERING IN THE PROCESS OF MAKING WEAR RESISTANCE STEEL WITH BAINITE STRUCTURE

By : Faisal Manta
Student Identity Number : 2113201012
Supervisor : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Materials that have good wear resistance and toughness properties are needed in the mining and construction sectors. However, such materials are difficult to obtain in local markets in Indonesia, so they must be imported from overseas. This research was conducted to make wear-resistant steel made from local material, by utilizing heat treatment process. The aim of this study is to produce a wear-resistant steel made from local materials in order to have the same characteristics as imported wear-resistant steel. The material used in this research are cast steel with chemical composition 0.65% C; 2.01% Si; 1.84% Mn; 1.27% Cr (0.6CCrMn2Si) and 0.8CCrMn1.6Si with 1.66% Si; 1.89% Mn; 1.24% Cr (0.8CCrMn1.6Si). Specimens of steel are forged at 700-900 °C, with a forging ratio of 3. The specimen is then annealed at 1000 °C for 8 hours. After the annealing process, the specimens are tempered with temperature varied at 150 °C, 200 °C and 250 °C for 160 and 330 hours. Afterwards, several tests were performed on austempering steel specimens. Testing process performed is micro structure by optical microscope , hardness test by Rockwell-C, impact test by Charpy and wear resistance test by Ogoshi methods. The austempering temperature of 150 °C in 0.6CCrMn2Si and 0.8CCrMn1.6Si steels has a lower bainite structure. Furthermore upper, lower bainite and retained austenite structures at austempering temperature of 200 °C and 250 °C. The hardness value of 0.6CCrMn2Si and 0.8CCrMn1.6Si steels by austempering at 150°C and holding time for 160 hours can be increased to 52 HRC. The Impact strength of 0.6CCrMn2Si and 0.8CCrMn1.6Si steels by austempering at 200 °C and holding time for 330 hours is 1.4 Kp.m and 1.6 Kp.m respectively. The specific abrasion value of 0.6CCrMn2Si and 0.8CCrMn1.6Si steel is reduced to less than 0.1 mm³ / mm.

Key words: *austempering, bainit, wear resistance material, wear test.*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah. Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis dengan judul **“PROSES AUSTEMPERING PADA PEMBUATAN BAJA TAHAN AUS BERSTRUKTUR BAINIT”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Adapun keberhasilan penulisan dalam penyusunan laporan ini tidak lepas berbagi pihak yang telah banyak memberikan bantuan, motivasi, dan dukungan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. **Ayah Abdul Azis Adam, Ibu Sulastri, Indah Meijayanti Manta dan Muhammad Fahrizal Manta dan keluarga besar** yang tiada hentinya memberikan doa dan dukungannya.
2. Bapak **Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan saran serta bimbinganya sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini.
3. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng** Kepala Program Studi Pascasarjana Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Bapak **Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc.**, bapak **Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA.**, dan bapak **Dr.Eng. Sutikno, S.T., M.T.** sebagai dosen penguji, atas saran dan masukan yang telah diberikan untuk menyempurnakan tesis ini.
5. Staf dan karyawan CV ICCI Surabaya yang bergerak di bidang pengecoran logam.
6. Bapak **Subandi**, sebagai pemilik UD. Surya Buana bergerak di bidang pembuatan dan perbaikan elemen pemanas.
7. Bapak **Imam**, sebagai pemilik *work shop* penempaan pisau dan pengerajin batu akik di Gresik.

8. **Muhammad Hafidh** dan **Khisni Sains** sebagai rekan dalam pengerjaan tesis ini atas dukungan, bantuan dan kerjasamanya.
9. Rekan-rekan karyawan Lab. Metalurgi **Pak Budianto, Pak Sumantri, Pak Endang, Pak Gatot** dan **Pak Agus** atas support dan bantuannya.
10. Rekan-rekan karyawan Lab. Manufaktur **Pak Faisal, Pak Sugianto** dan **Pak Luki** atas support dan bantuannya.
11. **Teman–teman seperjuangan Pascasarjana dan Sarjana Teknik Mesin** atas segala canda, tawa dan ilmu dibagikan selama ini.
12. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Mesin.
13. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, kami ucapkan terima kasih.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan laporan tesis ini masih belum sempurna, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata penulis berdoa agar segala bantuan yang diberikan akan mendapat balasan dan rahmat dari Allah SWT. Dan semoga hasil dari laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagaimana yang diharapkan. Amin

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL INDONESIA	i
HALAMAN JUDUL INGGRIS	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
 BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Baja	3
2.1.1 Baja Karbon	3
2.1.2 Baja Paduan	3
2.1.2.1 Baja Mangan	4
2.1.2.2 Baja Kromium	5
2.1.2.3 Baja Silikon	5
2.2 Sifat –Sifat Baja Tahan Aus	5
2.2.1 Sifat Kekerasan	6
2.2.2 Sifat Tahan Panas	7
2.2.3 Sifat Ketangguhan	7
2.3 Diagram <i>Isothermal Transformation</i>	9
2.4 Austempering	13

2.5 Transformasi Bainit	13
2.6 Sifat Baja Berstruktur Bainit	15
2.7 <i>Bainite free carbide</i>	19
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1 Alir Penelitian	21
3.2 Material	22
3.3 Peralatan Penelitian	23
3.4 Proses <i>Austempering</i>	24
3.5 Pengujian	26
3.5.1 Pengujian Komposisi Kimia	26
3.5.2 Observasi Strukturmikro	27
3.5.3 Pengujian Kekerasan	29
3.5.4 Pengujian Impak	31
3.5.5 Pengujian Ketahanan Aus	33
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pengujian sebelum Perlakuan Austempering	37
4.1.1 Pengujian Komposisi Kimia	37
4.1.1.1 Diagram <i>Isothermal Transformation</i> dan Martensit Start	38
4.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan	40
4.1.3 Observasi Strukturmikro	41
4.2 Pengujian setelah Perlakuan Austempering	43
4.2.1 Hasil Pengujian Kekerasan	43
4.2.2 Hasil Pengujian Impak	46
4.2.3 Hasil Pengujian Keausan Baja	51
4.2.4 Hasil Observasi Strukturmikro Baja	54
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Pengaruh kadar karbon pada diagram IT baja AISI 1080 dan AISI 1040.....	10
Gambar 2.2 Pengaruh unsur paduan selain karbon pada diagram IT baja AISI 1340 dan AISI 4340	12
Gambar 2.3 Skema proses <i>austempering</i> pada baja <i>hypoeutectoid</i>	13
Gambar 2.4 Struktur (a) <i>upper bainite feathery</i> dengan perlit halus dan matrik martensit dan (b) <i>lower bainite needlelike/lath</i> dengan matrik martensit.....	14
Gambar 2.5 Ilustrasi transformasi pembentukan (a) <i>upper bainite</i> dan (b) <i>lower bainite</i>	15
Gambar 2.6 Struktur bainit pada baja dengan (Ms) 310 °C temperatur <i>austempering</i> (a) 300 °C; (b) 320 °C; (c) 350 °C dan (d) 385 °C.....	18
Gambar 2.7 Struktur bainit tanpa karbida dengan (a) <i>optical micrograph</i> dan (b) <i>transmission electron micrograph</i>	19
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3.2 Dapur pemanas (<i>furnace</i>) austenisasi.....	23
Gambar 3.3 Dapur <i>salt bath</i> dalam proses <i>austempering</i>	23
Gambar 3.4 Gergaji mesin dan WEDM.....	24
Gambar 3.5 Masker dan perlengkapan keselamatan.....	24
Gambar 3.6 Skema perlakuan panas <i>austempering</i> pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si.....	25
Gambar 3.7 Dimensi dan permukaan uji spesimen komposisi kimia (mm).....	26
Gambar 3.8 Mesin spektrometer uji komposisi kimia.....	26
Gambar 3.9 Dimensi dan permukaan observasi spesimen strukturmikro (mm).....	27
Gambar 3.10 Mesin <i>grinding polishing</i> dan mikroskop <i>Olympus</i> dalam observasi strukturmikro.....	28
Gambar 3.11 Dimensi dan titik indentasi pada permukaan uji spesimen kekerasan (mm).....	29
Gambar 3.12 Mesin uji kekerasan <i>rockwell</i>	30
Gambar 3.13 Dimensi spesimen impak (mm).....	31
Gambar 3.14 Mesin uji impak.....	32
Gambar 3.15 Dimensi dan permukaan uji spesimen ketahanan aus (mm)...	33
Gambar 3.16 Mesin uji ketahanan aus <i>Ogoshi</i>	34
Gambar 4.1 Diagram IT baja JIS 45 SCD 6 (0.5%C;1.05%Mn;1.48%Si;1.20Cr)	38
Gambar 4.2 Grafik nilai kekerasan (HRC) terhadap baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si perlakuan annealing, normalising dan quenching serta <i>Hardox</i> dan <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	40
Gambar 4.3 Strukturmikro baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si perlakuan annealing.....	41

Gambar 4.4	Struktur mikro baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si perlakuan normalising.....	42
Gambar 4.5	Struktur mikro baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si perlakuan quenching.....	42
Gambar 4.6	Struktur mikro baja <i>Hardox</i> dan <i>Durostat</i> tanpa perlakuan....	43
Gambar 4.7	Nilai kekerasan (HRC) baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu tahan), kemudian baja <i>Hardox</i> , <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	44
Gambar 4.8	Nilai kekerasan (HRC) baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu tahan), kemudian baja <i>Hardox</i> , <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	45
Gambar 4.9	Nilai dampak baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan austempering (temperatur 150; 200; 250 °C; waktu penahanan 160; 330 jam), serta baja <i>Hardox</i> , <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	46
Gambar 4.10	Pola patahan baja <i>Durostat</i> dan <i>Hardox</i>	47
Gambar 4.11	Pola patahan getas baja 0.6CCrMn2Si hasil annealing.....	48
Gambar 4.12	Pola patahan getas baja austempering 0.6CCrMn2Si temperatur 200°C, waktu tahan 160 dan 330 jam.....	48
Gambar 4.13	Nilai dampak baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu penahanan), serta baja <i>Hardox</i> , <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	49
Gambar 4.14	Pola patahan baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing.....	50
Gambar 4.15	Pola patahan baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 160 dan 330 jam.....	51
Gambar 4.16	Nilai keausan baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu penahanan), serta baja <i>Hardox</i> , <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	52
Gambar 4.17	Nilai keausan baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu penahanan), serta baja <i>Hardox</i> , <i>Durostat</i> tanpa perlakuan.....	53
Gambar 4.18	Baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 150°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.....	54
Gambar 4.19	Baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.....	55
Gambar 4.20	Baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 250°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.....	55
Gambar 4.21	Pengendapan unsur paduan C, Cr, Mn dan Si pada uji SEM baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 330 jam, etsa nital 2%.....	56
Gambar 4.22	Baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 150°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.....	57
Gambar 4.23	Baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.....	58
Gambar 4.24	Baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 250°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.....	58

Gambar 4.25	Segregasi unsur paduan C, Cr, Mn dan Si pada uji SEM baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 330 jam, etsa nital 2%.....	59
-------------	---	----

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1	Jenis baja bainitik dan unsur paduannya..... 15
Tabel 2.2	Parameter proses <i>austempering</i> dan <i>quenched temper</i> yang dilakukan serta sifat mekanik yang dihasilkan..... 16
Tabel 2.3	Perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian..... 16
Tabel 2.4	Nilai kekerasan dan keausan baja berstruktur bainit, perlit, martensit, dan baja lainnya..... 17
Tabel 2.5	Temperatur austempering yang digunakan dalam penelitian X.Y. Long (nilai M_s 310 °C)..... 17
Tabel 2.6	Temperatur <i>austempering</i> terhadap struktur dan fase yang dihasilkan..... 18
Tabel 2.7	Nilai <i>impact toughness</i> dan kekerasan bainit terhadap variasi temperatur <i>austempering</i> 19
Tabel 3.1	Komposisi kimia baja pembanding dan baja eksperimen..... 22
Tabel 3.2	Rancangan percobaan proses <i>austempering</i> pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si..... 25
Tabel 3.3	Desain eksperimen komposisi kimia..... 26
Tabel 3.4	Desain observasi strukturmikro..... 28
Tabel 3.5	Desain eksperimen uji kekerasan..... 30
Tabel 3.6	Desain pengujian impak..... 32
Tabel 3.7	Desain pengujian <i>wear resistance</i> 34
Tabel 4.1	Hasil pengujian komposisi kimia baja 0.8CCrMn1.6Si; 0.6CCrMn2Si; <i>Hardox</i> dan <i>Durostat</i> 37
Tabel 4.2	Temperatur M_s hasil perhitungan persamaan 2.1 dan program <i>Map Steel</i> baja 0.8CCrMn1.6Si, 0.6CCrMn2Si dan baja referensi..... 39

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja karbon merupakan salah satu jenis material yang paling banyak digunakan pada dunia industri, karena harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan material lainnya. Baja karbon juga dimanfaatkan dalam pembuatan baja tahan aus, banyak digunakan di industri tambang batu bara sebagai material pembuatan *bucket excavator* dan *dump body* [1]. Baja tersebut mampu bertahan terhadap gesekan yang terjadi selama proses pengerukan dan pengangkutan, sehingga memperpanjang masa pakai dari unit kendaraan. Baja tahan aus dibuat menggunakan metode TMCP (*Thermo Mechanical Control Process*) yaitu metode yang mengkombinasikan proses pengecoran, pengerollan dan perlakuan panas terkendali didalam satu *line* proses [2]. Proses pembuatan yang kompleks menyebabkan tingginya harga baja tahan aus. Baja tahan aus dengan nama dagang *hardox*, *durostat* dan *sumirad* merupakan produk baja impor yang umum ditemukan dipasaran, hal ini dikarenakan kurangnya ketersediaan baja tahan aus lokal. Demi menggalakkan produksi baja tahan aus lokal, maka dilakukan penelitian untuk memperoleh proses pembuatan yang sederhana dengan kualitas yang sama dengan baja impor.

Penelitian baja tahan aus yang telah dilakukan oleh T.Sourmail tahun 2013 menyatakan bahwa baja tahan aus dapat dibuat dengan proses *austempering* pada temperatur rendah. Baja tahan aus dengan unsur paduan utama karbon, mangan, silikon dan kromium menunjukkan hasil yang lebih baik dari produk *Hardox*[3].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka rumusan masalah dari penelitian adalah pengaruh temperatur dan waktu *austempering* pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si terhadap kombinasi struktur mikro, kekerasan, ketangguhan dan ketahanan aus.



1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian dan pembahasan lebih fokus terhadap tujuan, maka diberlakukan batasan masalah adalah kondisi peralatan yang digunakan saat pengujian dan pengambilan data telah terkalibrasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur dan waktu *austempering* pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si terhadap struktur mikro, kekerasan, ketangguhan dan ketahanan aus.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian diharapkan dapat menemukan proses pembuatan baja tahan aus terhadap baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si.



BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Baja

Baja adalah logam paduan, di mana besi sebagai unsur utama dan karbon sebagai unsur paduan utama yang beratnya tidak lebih dari 2%. Selain karbon unsur paduan lain yang umum ditambahkan adalah mangan, kromium dan silikon dengan tujuan untuk memperbaiki sifat mekanik baja. Kombinasi antara karbon dan unsur paduan tersebut mampu menghasilkan berbagai jenis kualitas baja. Berdasarkan komposisi kimianya, baja dapat diklasifikasikan menjadi baja karbon dan baja paduan [4].

2.1.1 Baja karbon

Baja karbon merupakan baja dengan unsur paduan utama karbon, di mana jumlah unsur paduan lain terlalu kecil untuk mempengaruhi sifatnya [4]. Baja karbon sangat baik digunakan pada sistem yang mengutamakan kekuatan, bekerja di temperatur atmosfer, dan kondisi non-korosif. Kekerasan dan kekuatan baja karbon meningkat seiring dengan kenaikan kadar karbon, namun demikian untuk aplikasi tertentu seperti *tool steel*, *ball and roller bearing*, dan *spring steel* sifat keuletan dan *hardenability* kurang mencukupi. Kekurangan tersebut diatasi dengan dibuatnya baja paduan.

2.1.2 Baja paduan

Baja paduan didefinisikan sebagai suatu baja karbon yang dicampur dengan satu atau lebih unsur campuran diantaranya nikel, mangan, molybdenum, kromium, silikon, vanadium, dan wolfram dalam jumlah tertentu untuk memperoleh sifat-sifat yang dikehendaki [5]. Menurut fungsinya, unsur paduan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok, diantaranya :

- 1 Unsur penstabil austenit

Unsur utama penstabil austenit adalah Nickel (Ni) dan Mangan (Mn), dikenal sebagai *stabilizer* austenit. Unsur tersebut akan menurunkan



temperatur *eutectoid* sesuai persentasi jumlah yang terlarut, sehingga austenit stabil pada temperatur kamar. Kombinasi unsur tersebut dengan besi dan karbon membentuk baja berstruktur austenitik.

2 Unsur penstabil ferit

Yang termasuk kelompok ini adalah unsur Cr, Si, Mo, W dan Al disebut sebagai *stabilizer* ferit. Unsur tersebut akan meningkatkan temperatur *eutectoid* sesuai persentasi jumlah yang terlarut, sehingga mampu menstabilkan ferit hingga temperatur sebelum peleburan. Penambahan unsur tersebut pada baja karbon dapat membentuk baja berstruktur feritik.

3 Unsur pembentuk karbida

Yang termasuk unsur pembentuk karbida adalah Cr, W, Mo, V dan Ti. Unsur-unsur tersebut memiliki kecenderungan untuk membentuk karbida. Secara umum karbida pada baja akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan keuletan. Karbida kompleks yang terbentuk sulit larut dalam austenit, menurunkan kadar karbon dan unsur paduan secara menyeluruh serta menghambat pertumbuhan butir kital, sehingga menurunkan *hardenability* baja. Disisi lain saat unsur pembentuk karbida tersebut larut dalam austenit dapat meningkatkan kedalaman kekerasan.

Unsur paduan dalam baja dapat terdistribusi sebagai larutan padat (*solid solution*) atau senyawa yang berikatan dengan karbon. Berdasarkan kadar unturnya baja paduan dibedakan menjadi baja paduan rendah, medium dan tinggi. Baja paduan rendah memiliki total unsur paduan antara 1% - 4%, baja paduan medium 4%-10% dan baja paduan tinggi lebih dari 10%. Baja paduan yang digunakan sebagai baja tahan aus diantaranya adalah baja mangan, baja kromium dan baja silikon.

2.1.2.1 Baja Mangan

Baja mangan merupakan baja dengan kandungan mangan lebih dari 0.8%. Unsur mangan umum digunakan sebagai *deoxidizer* sehingga hampir selalu ditemukan di dalam baja. Mangan meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja, meskipun tidak lebih tinggi dari karbon. Dilain pihak mangan dapat menurunkan temperatur dan kandungan karbon titik *eutectoid*. Mangan termasuk



unsur pembentuk karbida yang lemah, larut tidak terbatas dalam austenit, dan larut dalam ferit maksimal 3%.

Baja mangan dengan kandungan 12% Mn berstruktur austenitik memiliki kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan aus yang tinggi sehingga banyak diaplikasikan sebagai *power-shovel buckets and teeth*, mesin *grinding*, dan *crushing*.

2.1.2.2 Baja Kromium

Baja dengan kandungan kromium lebih dari 0.7% disebut baja kromium. Kromium merupakan unsur pembentuk karbida yang lemah, namun lebih kuat dari Mn. Kromium meningkatkan temperatur dan menurunkan kadar karbon titik *eutectoid*. Kromium larut tidak terbatas dalam ferit dan larut terbatas dalam austenit maksimal 13%. Baja karbon tinggi dengan kandungan kromium 1.5% memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang baik sehingga banyak diaplikasikan sebagai pembuatan *ball & roller bearing* serta mesin *crushing*. Kromium dengan kadar lebih dari 5% akan meningkatkan ketahanan baja terhadap korosi dan temperatur tinggi.

2.1.2.3 Baja Silikon

Baja silikon merupakan baja dengan kandungan silikon lebih dari 0.6% . Unsur silikon umum digunakan sebagai *deoxidizer* sehingga dapat ditemukan hampir di semua jenis baja. Silikon bukanlah unsur pembentuk karbida, tetapi larut terbatas di dalam ferit maksimal 18.5%. Baja dengan kandungan silikon 1 – 2% digunakan pada struktur yang membutuhkan kekuatan tinggi. Unsur kombinasi antara mangan dan silikon menghasilkan baja dengan kekuatan dan ketangguhan baik, contoh adalah baja silikon-mangan AISI 9260 banyak digunakan sebagai *coil* dan *leaf springs*.

2.2 Sifat-Sifat Baja Tahan Aus

Baja tahan aus merupakan baja yang dibuat khusus dalam penggunaannya mampu meminimalisir kerusakan permukaan. Contoh baja tahan aus impor yang dapat ditemukan di pasaran adalah *Hardox* dan *Durostat*. *Hardox* dan *Durostat*



memiliki nilai kekerasan antara 370-550 HB, kekuatan impak 30-45 joule pada temperatur -40°C , dan kekuatan tarik 1000-1550 MPa. *Hardox* dan *Durostat* banyak dipakai sebagai *shovels*, *tipper body*, *conveyor* dan *excavator*. Kombinasi sifat kekerasan, ketangguhan dan ketahanan panas harus dimiliki oleh baja tahan aus dan sifat-sifat tersebut dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah fase, strukturmikro, larutan padat, ukuran butiran dan lain-lain.

2.2.1 Sifat Kekerasan

Sifat kekerasan merupakan kemampuan baja untuk tahan terhadap goresan atau indentasi. Metode pengerasan yang umum digunakan pada baja adalah menambahkan unsur paduan membentuk larutan padat (*solid solution*), memperkecil ukuran butiran krital (*grain size effect*), pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*), *work hardening*, transformasi fase.

Pembentukan larutan padat melalui cara penambahan unsur paduan dapat terjadi dengan dua cara yaitu *substitutional* dan *interstitial solid solution*. *Substitutional solution* adalah saat atom terlarut menggantikan posisi atom pelarut, seperti unsur Cu (128 pikometer) dan Ni (124 pm). *Substitutional solution* larut tidak terbatas terjadi jika perbedaan diameter atom terlarut tidak lebih 15% dari atom pelarut (Fe 126pm) dan larut terbatas jika lebih besar dari 15%. Pada saat diameter atom terlarut cukup kecil, seperti unsur C (69 pm), N(71 pm), (53 pm) dan B(90 pm), untuk mampu menyusup diantara atom-atom pelarut besi maka disebut *Interstitial solution*. Perbedaan ukuran antara atom terlarut dan pelarut tersebut menimbulkan tegangan. Tegangan tersebut menghambat pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan kekuatan dan kekerasan material.

Memperkecil ukuran butir kristal merupakan metode pengerasan dengan cara menghaluskan butir krital baja. Baja berbutir kristal halus memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan baja berbutir kristal kasar pada fase yang sama. Baja berbutir halus didapatkan dengan penambahan unsur paduan seperti Al, Nb, Ti atau V.

Pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*) merupakan metode pengerasan melalui dua proses yaitu *solution treatment* dan *aging*, digunakan hanya pada baja ataupun *non-ferrous* memiliki batas kelarutan. *Solution treatment*



dilakukan dengan cara pemanasan hingga mencapai fasa tunggal, diberikan penahan untuk homogenisasi, lalu didinginkan cepat hingga temperatur kamar untuk menghasilkan larutan padat lewat jenuh. Pada proses *aging* larutan padat lewat jenuh diberikan penahanan (*isothermal*) pada temperatur dan selang waktu tertentu. Proses *aging* dilakukan pada temperatur kamar disebut *natural aging*, sedangkan *aging* diatas temperatur kamar disebut *artificial aging*. Kekerasan meningkat dengan munculnya sebaran halus presipitasi selama *aging*. Kekerasan yang dicapai dipengaruhi oleh komposisi kimia, temperatur dan waktu penahan *aging*.

Work hardening merupakan proses pengerasan baja dengan cara memberi deformasi plastis, umumnya dilakukan di bawah temperatur *re-kristalisasi*. Sifat mekanik yang dihasilkan dipengaruhi oleh derajat deformasi. Seiring dengan kenaikan derajat deformasi maka kekerasan dan kekuatan akan meningkat, namun ketangguhan berkurang.

Metode pengerasan dengan transformasi fase pada baja dilakukan dengan quenching. Quenching terdiri dari pemanasan hingga temperatur austenit, diberikan penahanan untuk homogenisasi austenit, lalu di dinginkan cepat ke temperatur kamar untuk membetuk fase martensit. Fase martensit memiliki sifat keras dan getas. Kekerasan martensit meningkat seiring meningkatnya kadar karbon baja.

2.2.2 Sifat Tahan Panas

Sifat tahan panas merupakan kemampuan baja terhadap lingkungan temperatur tinggi tanpa menurunkan kekerasan baja tersebut. Penambahan unsur seperti Cr, T, dan Mo dapat meningkatkan sifat tahan panas baja.

2.2.3 Sifat Ketangguhan

Ketangguhan merupakan kemampuan baja untuk menyerap energi. Ketangguhan baja ditingkatkan untuk mencegah kerusakan saat terjadi benturan dengan material lainnya. Faktor yang berpengaruh terhadap ketangguhan adalah jenis dan jumlah fase yang ada, strukturmikro, adanya tegangan sisa dan deformasi plastis



Pada berbagai baja karbon kondisi equilibrium di temperatur kamar memiliki fase yang sama yaitu ferit dan sementit, meskipun demikian strukturmikro berbeda. Struktur perlit dan ferit untuk baja *hypoeutectoid*, perlit untuk baja *eutectoid*, perlit dan sementit untuk baja *hypereutectoid*. Pada perlakuan *isothermal* terbentuk struktur bainit dengan ketangguhan tinggi. Transformasi bainit terjadi pada temperatur konstan disebut proses austempering. Ketangguhan pada bainit meningkat seiring turunnya temperatur transformasi, hingga mendekati temperatur M_s (*martensite start*)

Kekerasan baja karbon meningkat seiring dengan kenaikan persen karbon, meskipun dengan fase yang sama yaitu ferit dan sementit. Baja *hypereutectoid* karbon tinggi memiliki kekerasan tinggi namun ketangguhan rendah, karena adanya *cementite network* bersifat keras dan getas. Ketangguhan baja *hypereutectoid* ditingkatkan dengan proses *spheroidizing annealing*. *Spheroidizing annealing* terdiri dari pemanasan di bawah temperatur *eutectoid*, ditahan kemudian didinginkan udara ke temperatur kamar. Struktur *cementite network* diubah menjadi berbentuk *globular* bermatrik ferit sehingga meningkatkan keuletan, ketangguhan, dan *machinability*.

Proses quenching pada baja karbon membentuk fase martensit yang memiliki kekerasan tinggi namun ketangguhan rendah. Ketangguhan baja hasil quenching ditingkatkan dengan proses tempering. Tempering terdiri dari proses pemanasan ulang fase martensit hasil quenching di bawah temperatur *eutectoid*, ditahan kemudian didinginkan udara ke temperatur kamar. Pada tempering terbentuk struktur martensit temper yang memiliki ketangguhan baik. Peningkatan ketangguhan dipengaruhi oleh komposisi kimia baja, temperatur dan waktu penahanan tempering.

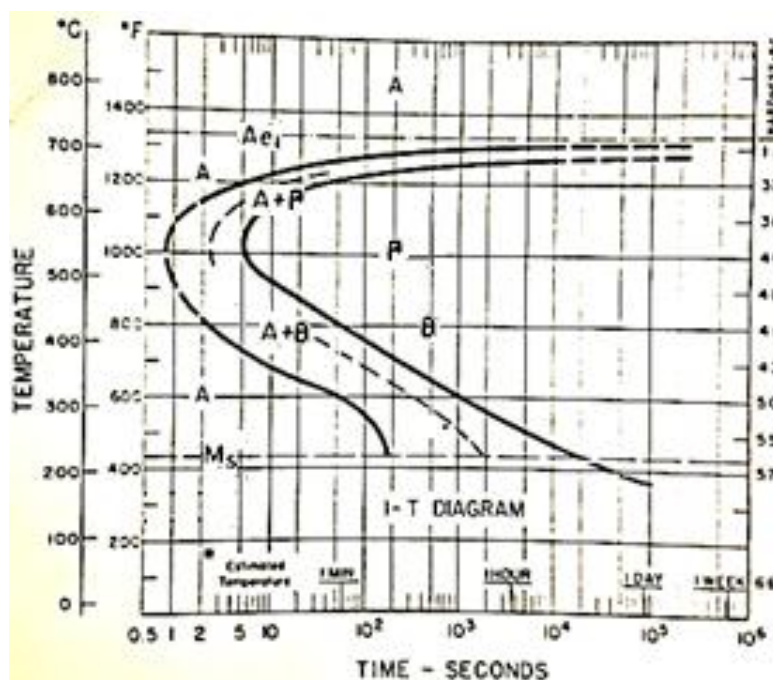
Tegangan sisa pada baja dapat muncul akibat proses quenching, permesinan dan pembentukan (*forming*). Keberadaan tegangan sisa meningkatkan kekerasan baja, namun menurunkan ketangguhan. Ketangguhan baja ditingkatkan dengan cara *stress-relief annealing*. *Stress-relief annealing* terdiri dari proses pemanasan baja di bawah temperatur *re-kristalisasi*, ditahan kemudian didinginkan udara ke temperatur kamar.



Pada baja setelah mengalami pengerjaan deformasi plastis kekerasan meningkat, meskipun ketangguhan berkurang. Ketangguhan ditingkatkan dengan melakukan proses *re-kristalisasi*. *Re-kristalisasi* terdiri dari pemanasan di atas temperatur kristalisasi, ditahan lalu didinginkan ke temperatur kamar. Pada *re-kristalisasi* terjadi pembentukan kital baru yang bebas dari deformasi.

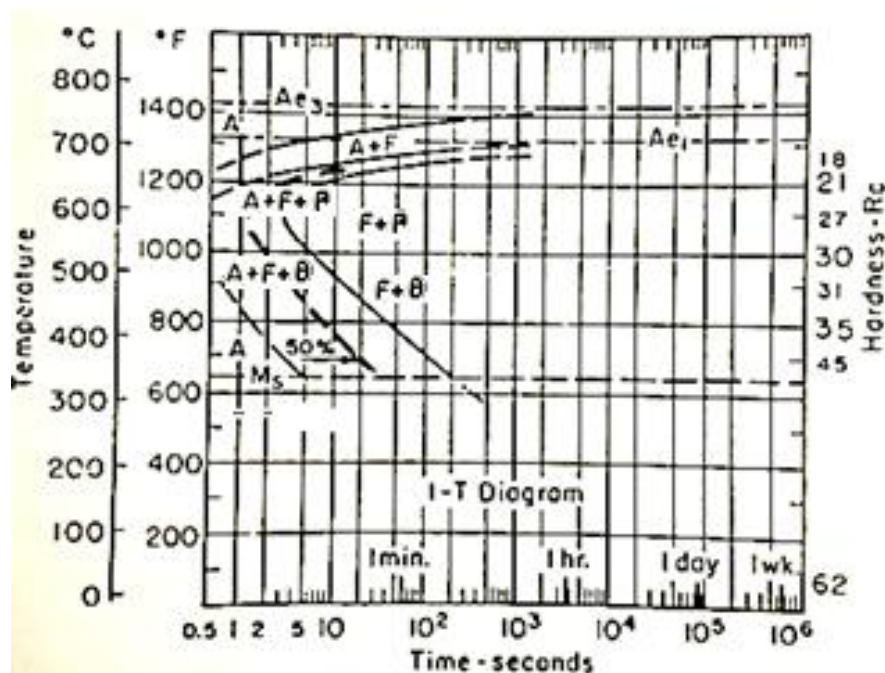
2.3 Diagram *Isothermal Transformation*

Diagram *isothermal transformation* (IT) merupakan diagram yang menunjukkan transformasi fase austenit pada temperatur konstan. Diagram IT digunakan untuk menganalisa perubahan fase dan struktur pada perlakuan *isothermal*. Baja dengan komposisi kimia berbeda memiliki diagram IT yang berbeda pula. Berikut adalah diagram IT baja karbon yaitu seri AISI 1040 (0.43%C), dan AISI 1080 (0.79%C;)[20].



(a)

(AISI 1080 0.79%C)



(b)

(AISI 1040 0.43%C)

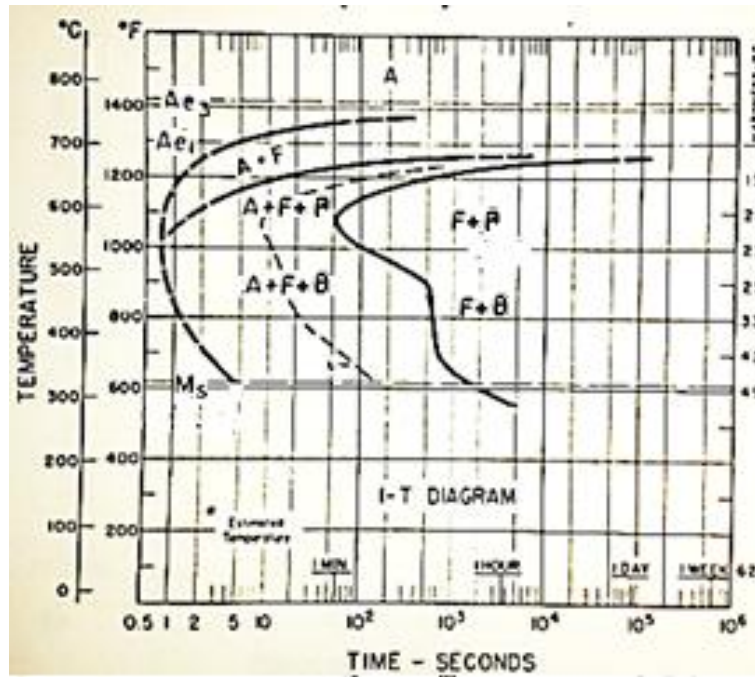
Gambar 2.1 Pengaruh kadar karbon pada diagram IT baja AISI 1080 dan AISI 1040 [20]

Diagram IT meliputi grafik temperatur terhadap waktu berupa kurva C dengan ujung disebut “nose”. Pada temperatur di atas *nose* terbentuk struktur perlit, semakin halus saat mendekati temperatur *nose*. Struktur bainit terbentuk di bawah temperatur *nose*. Pada temperatur yang lebih rendah terdapat garis horizontal disebut garis *martensit start* (M_s). Pada temperatur di bawah M_s ditemukan struktur martensit. Struktur bainit dan fase martensit tidak ditemukan dalam diagram fase equilibrium Fe-Fe₃C.

Diagram IT baja *eutectoid* AISI 1080 (0.79%C) memiliki kurva C dengan *nose* di sekitar temperatur 550 °C ,waktu 1 detik dan M_s 220 °C (Gambar 2.1 (a)). Penurunan kadar karbon menggeser kurva C ke kiri atas dan menaikkan temperatur M_s seperti pada baja AISI 1040 (0.43%). Baja AISI 1040 (0.43%) memiliki kurva C dengan *nose* di sekitar temperatur 600 °C, waktu kurang dari 1 detik dan M_s 330 °C (Gambar 2.1 (b)).

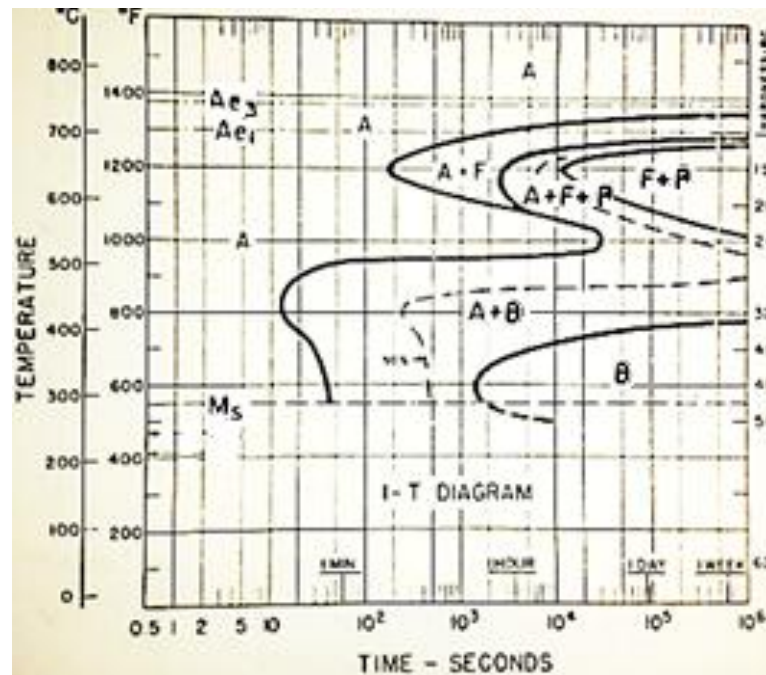


Pada baja paduan juga memiliki diagram IT yang berbeda. Berikut adalah diagram IT baja paduan dengan kadar karbon sama, yaitu baja seri AISI 1340 (0.43%C; 1.58%Mn), dan AISI 4340 (0.42%C; 0.78%Mn; 1.79%Ni; 0.80%Cr; 0.33%Mo) [20].



(a)

(AISI 1340 0.43%C; 1.58%Mn)



(b)

(AISI 4340 0.42%C; 0.78%Mn; 1.79%Ni; 0.80%Cr; 0.33%Mo)

Gambar 2.2 Pengaruh unsur paduan selain karbon pada diagram IT baja AISI 1340 dan AISI 4340 [20]

Diagram IT baja AISI 1340 memiliki kurva C yang bergeser ke kanan dengan penambahan unsur Mn, sehingga *nose* disekitar temperatur 650 °C, waktu 0.5 detik dan Ms 330 °C (Gambar 2.2 (a)). Penambahan unsur Ni dan Mn juga menggeser kurva C ke kanan, sedangkan unsur Cr dan Mo hanya menggeser kurva C perlit (kurva diatas *nose*) ke kanan membentuk “*nose*” dan “*knee*” seperti pada baja AISI 4340. Baja AISI 4340 memiliki kurva C dengan *nose* sekitar temperatur 650 °C, waktu lebih dari 1 menit, kemudian *knee* sekitar temperatur 450 °C, waktu 10 detik dan Ms 290 °C (Gambar 2.2 (b))

Nilai Ms ditentukan dengan eksperimen. Beberapa peneliti telah merumuskan nilai Ms berdasarkan komposisi kimia baja tanpa melakukan eksperimen, seperti yang dituangkan pada Persamaan 2.1



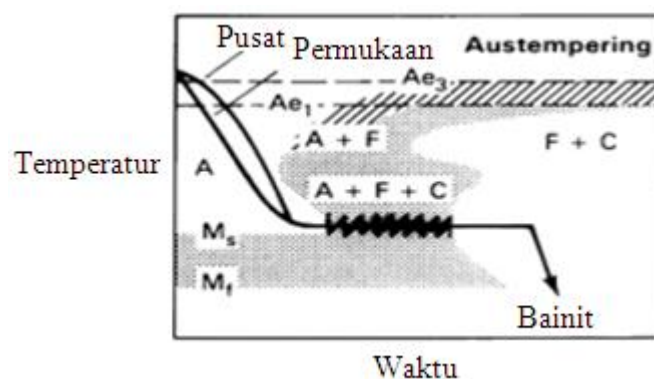
Tahun 2009 Van Bohemen [16] merumuskan nilai M_s dengan persamaan 2.1

$$M_s (^{\circ}\text{C}) = 565 - 31.Mn - 13.Si - 10.Cr - 18.Ni - 12.Mo - 600 [1 - \exp(-0,96.C)] \dots\dots\dots (2.1)$$

Unsur Mn dan Ni sebagai penstabil austenit yang menurunkan temperatur *eutectoid* dan menggeser kurva C ke kanan. Unsur Cr, Si dan Mo sebagai unsur penstabil ferit meningkatkan temperatur *eutectoid* dan hanya menggeser kurva C perlit ke kanan.

2.4 Austempering

Proses austempering merupakan proses perlakuan panas untuk mendapatkan struktur bainit. Struktur bainit dapat meningkatkan keuletan baja dibandingkan pada kondisi equilibrium. Proses austempering diawali dengan pemanasan baja hingga temperatur austenit, ditahan untuk mendapat fase austenit homogen, didinginkan cepat hingga temperatur diatas M_s , ditahan (*isothermal*) hingga transformasi bainit selesai, didinginkan dengan udara ke temperatur kamar seperti pada Gambar 2.3. Penahanan dilakukan didalam media seperti *salt bath* atau oli ke kurva pembentukan bainit.



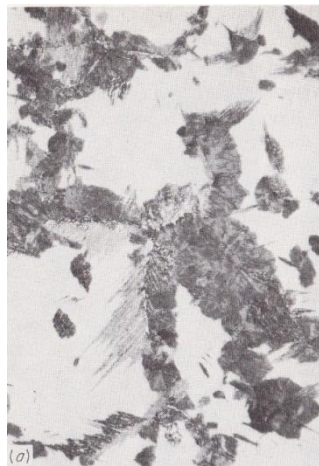
Gambar 2.3 Skema proses austempering pada baja *hypoeutectoid* [8]

2.5 Transformasi Bainit

Bainit merupakan mikrostruktur yang menunjukkan dekomposisi austenit (γ) menjadi ferit (α) dan sementit (Fe_3C), terjadi pada temperatur di bawah *nose* hingga di atas M_s . Berdasarkan strukturnya bainit dibedakan menjadi dua tipe



yaitu *upper bainite* dan *lower bainite*. *Upper bainite* adalah struktur yang terbentuk di temperatur relatif tinggi (mendekati *nose*) dan tampak seperti bulu (*feathery*) (Gambar 2.4(a)). *Lower bainite* adalah struktur yang terbentuk di temperatur relatif rendah (mendekati *Ms*), tampak seperti jarum (*needlelike*) (Gambar 2.4 (b)). Kekerasan *upper bainite* mencapai 40 HRC dan *lower bainite* 60 HRC. Kekerasan meningkat disebabkan oleh struktur semakin halus dan jarak antara karbida semakin dekat.



(*upper bainite feathery*) 1000x

(a)



(*lower bainite needlelike/lath*) 2500x

(b)

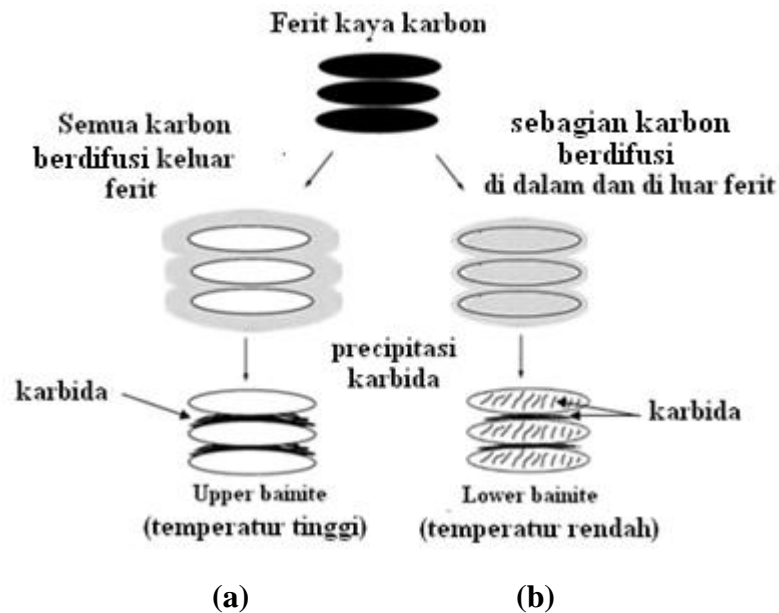
Gambar 2.4 Struktur (a) *upper bainite feathery* dengan perlit halus, matrik martensit dan (b) *lower bainite needlelike/lath* dengan matrik martensit [5].

Pada *upper bainite*, austenit stabil diquench ke temperatur di bawah *nose* menjadi austenit tidak stabil, lalu ditahan (*isothermal*). Transformasi bainit terjadi saat penahanan tersebut. Austenit tidak stabil membentuk ferit lewat jenuh (*ferrite supersaturated*). Karbon berdifusi keluar butir ferit menuju batas butir membentuk karbida (Gambar 2.5 (a)).

Pada *lower bainite*, fase austenit stabil didinginkan cepat ke temperatur austempering (mendekati temperatur *Ms* baja) menjadi austenit tidak stabil, lalu ditahan (*isothermal*). Austenit tidak stabil mulai membentuk ferit lewat jenuh (*ferrite supersaturated*). Sebagian karbon berdifusi menuju ke bidang kristalografi tertentu dan sebagian lainnya berdifusi keluar ferit membentuk karbida (Gambar



2.5 (b)). Transformasi terjadi pada temperatur rendah, sehingga jarak difusi pendek.



Gambar 2.5 Ilustrasi transformasi pembentukan (a) *upper bainite* dan (b) *lower bainite* [11].

2.6 Sifat Baja Berstruktur Bainit

Baja bainit dibuat dengan berbagai tujuan aplikasi, maka pada Tabel 2.1 diinformasikan jenis baja bainitik dan unsur paduan penyusunnya.

Tabel 2.1 Jenis baja bainitik dan unsur paduannya [22].

Chemical composition, wt%, of typical bainitic steels										
Alloy	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	V	B	Nb	Other
Early bainitic steel	0.10	0.25	0.5	-	-	0.003	-	-	-	
Ultra-low carbon	0.02	0.20	2.0	0.3	0.30	-	-	0.010	0.05	
Ultra-high strength	0.20	2.00	3.0	-	-	-	-	-	-	
Creep resistant	0.15	0.25	0.50	-	1.00	2.30	-	-	-	
Forging alloy	0.10	0.25	1.00	0.50	1.00	-	-	-	0.10	
Inoculated	0.08	0.20	1.40	-	-	-	-	-	0.10	0.012 Ti
Nanostructured	1.0	1.50	1.90	-	0.26	1.26	0.1	-	-	

Grosmaann dan Bain [13] meneliti baja karbon tinggi dengan komposisi kimia 0.74C; 0.37Mn; 0.145Si; 0.039Si; 0.044P (% berat). Perlakuan berupa



austempering dan *quench-temper* dengan parameter, seperti pada Tabel 2.2. Pada Tabel 2.2 ditunjukkan juga sifat mekanik baja berupa *ultimate strength*, *yield point*, *elongation*, dan *impact*. Baja hasil austempering memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan baja hasil *quench-temper* pada kekerasan yang sama.

Tabel 2.2 Parameter proses austempering dan *quench-temper* yang dilakukan serta sifat mekanik yang dihasilkan [13].

Steel composition: 0.74C, 0.37Mn, 0.145Si, 0.039S, 0.044P			
New Method, Direct from Austenite		Quench-and-Temper Method	
Heat 5 min at 790°C (1450°F)		Heat 5 min at 790°C (1450°F)	
Quench into lead alloy bath at 305°C (580°F)		Quench into oil at 21°C (70°F)	
Let specimens remain in bath for 15 min		Temper immediately in lead alloy bath, 30 min at 315°C (600°F)	
Quench into water		Quench into water	
Mechanical Properties (Average of 6 tests)		Mechanical Properties (Average of 6 tests)	
Rockwell C hardness	50.4	Rockwell C hardness	50.2
Ultimate strength, ksi	282.7	Ultimate strength, ksi	246.7
Yield point, ksi	151.3	Yield point, ksi	121.7
Elongation, % in 6 inches	1.9	Elongation, % in 6 inches	0.3
Reduction of area, %	34.5	Reduction in area, %	0.7
Impact, ft-lb(a)	35.3	Impact, ft-lb(a)	2.9
(a) Foot-pounds absorbed in breaking 0.180-inch round, unnotched specimens			

Bhadeshia dan kawan-kawan [14] meneliti baja karbon tinggi dengan komposisi kimia 0.83C; 2.28Mn; 1.9Si; 1.44Cr; 1.55Co; 0.044Al; 0.011P; 0.008S; 0.12Cu; 0.24Mo; 0.11V; 0.019Sn; 0.023Nb(% berat). Pada penelitian dilakukan tiga perlakuan panas yang berbeda (sesuai pada Tabel 2.3) untuk menghasilkan struktur perlit, bainit dan martensit. Pada Tabel 2.4 ditunjukkan bahwa baja berstruktur bainit memiliki ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan baja dengan struktur lainnya.

Tabel 2.3 Perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian [14].

Sample	Heat treatment
Pearlite	930 °C 1 h, cooled 0.1 °C s ⁻¹ to 550 °C, held for 4 h, air-cooled
Bainite	930 °C 1 h, air cooled to 200 °C, held for 10 days, air cooled
Martensite	930 °C 1 h, air cooled



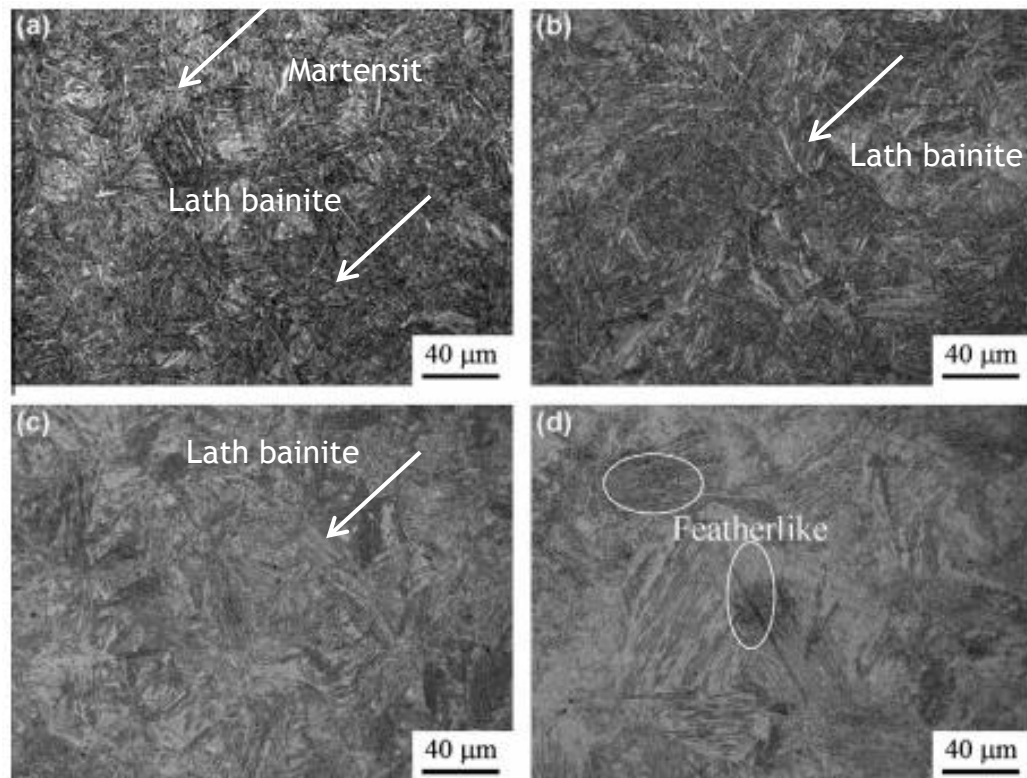
Tabel 2.4 Nilai kekerasan dan keausan baja berstruktur bainit, perlit, martensit, dan baja lainnya [14].

Steel	Hardness (kgf mm ⁻²)	Specific wear rate (mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹ /10 ⁻⁵)
Pearlite	378	8.7
Bainite	622	8.1
Martensite	739	9.4
Hardox500	530	12.7
Stainless steel, type 304	164	91.1
Low-alloy steel, ASTM A514	286	71.8
Low-alloy steel, AISI 4340	560	39.6
Tool steel, type D2	640	7.8
Carbon steel, AISI 1060	795	17.2
Armco Iron	80	67.3
AISI 1006	117	82.7
AISI 1013	242	55.7
Hardox400	473	31.53
Ground flat stock, tool steel	830	36.5

X.Y Long [12] meneliti baja karbon medium komposisi kimia 0.34C; 1.52Mn; 1.48Si; 1.15Cr; 0.71Al; 0.93Ni; 0.40Mo (% berat) dimana temperatur M_s baja adalah 310 °C. Tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan baja dengan struktur *bainite free carbide* pada *upper* dan *lower bainite*. Temperatur austempering yang digunakan adalah 385, 350 dan 320 °C (Tabel 2.5). Struktur yang dimiliki pada tiap temperatur austempering (Gambar 2.6 dan Tabel 2.6).

Tabel 2.5 Temperatur austempering yang digunakan dalam penelitian X.Y Long (nilai M_s 310 °C) [12].

Parameter	Temperatur (°C)
$T_1 > M_s + 75$	$T_1 = 385$
$M_s + 10 < T_2 < M_s + 75$	$T_2 = 350$
$T_3 < M_s + 10$	$T_3 = 320$



Gambar 2.6 Struktur bainit pada baja dengan (M_s) 310 °C temperatur *austempering* (a) 300 °C; (b) 320 °C; (c) 350 °C dan (d) 385 °C [12].

Tabel 2.6 Temperatur austempering terhadap struktur dan fase yang dihasilkan[12].

Temperatur Austempering	Struktur mikro (M_s 310 °C)
300 °C	<i>lath bainite</i> , martensit dan austenit sisa (Gambar 2.7 (a))
320 °C	<i>lath bainite</i> dan austenit sisa, tanpa fase martensit, struktur lebih halus dibandingkan temperatur 350 °C (Gambar 2.7 (b))
350 °C	<i>lath bainite</i> dan austenit sisa (Gambar 2.7 (c))
385 °C	<i>bainite feather</i> dan austenit sisa (Gambar 2.7 (d))

Nilai *impact* maksimum dicapai di temperatur *austempering* 310-320°C (Tabel 2.7). Nilai tersebut menunjukkan bahwa transformasi bainit pada temperatur mendekati nilai M_s memiliki sifat mekanik yang lebih baik.

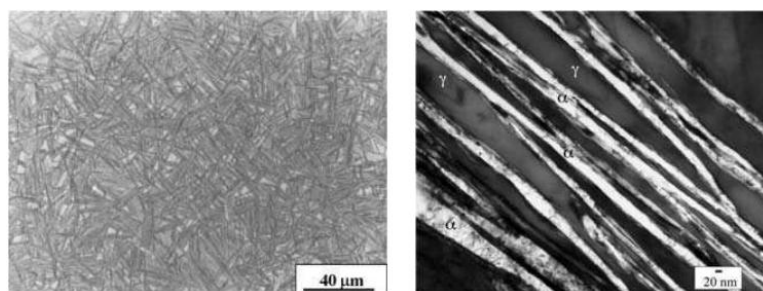


Tabel 2.7 Nilai *impact toughness* dan kekerasan bainit terhadap variasi temperatur *austempering* [12].

Austempering temperature	Impact toughness (J/cm ²)	HRC
300 °C × 1 h	100	47.0
310 °C × 1 h	112	47.2
315 °C × 1 h	115	46.7
320 °C × 1 h	109	46.0
340 °C × 1 h	92	44.0
360 °C × 1 h	90	41.5
380 °C × 1 h	88	42.0
388 °C × 2 h	74	43.5
395 °C × 2 h	70	44.4
405 °C × 2 h	66	43.5

2.7 Bainite free carbide

“*Bainite free carbide*” merupakan struktur terbentuk pada daerah transformasi bainit dengan penambahan unsur paduan yang mampu menghambat pertumbuhan karbida atau sementit. Struktur *Bainite free carbide* terdiri dari fase ferit dan austenit sisa (Gambar 2.7), memiliki kombinasi sifat ketangguhan, kekerasan dan ketahanan aus yang baik. Penambahan unsur paduan seperti silikon dan aluminium diharapkan dapat menekan secara keseluruhan pertumbuhan sementit selama transformasi.



(optical micrograph) (transmission electron micrograph)

(a) (b)

Gambar 2.7 Struktur bainit tanpa karbida dengan (a) *optical micrograph* dan (b) *transmission electron micrograph* [2].



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

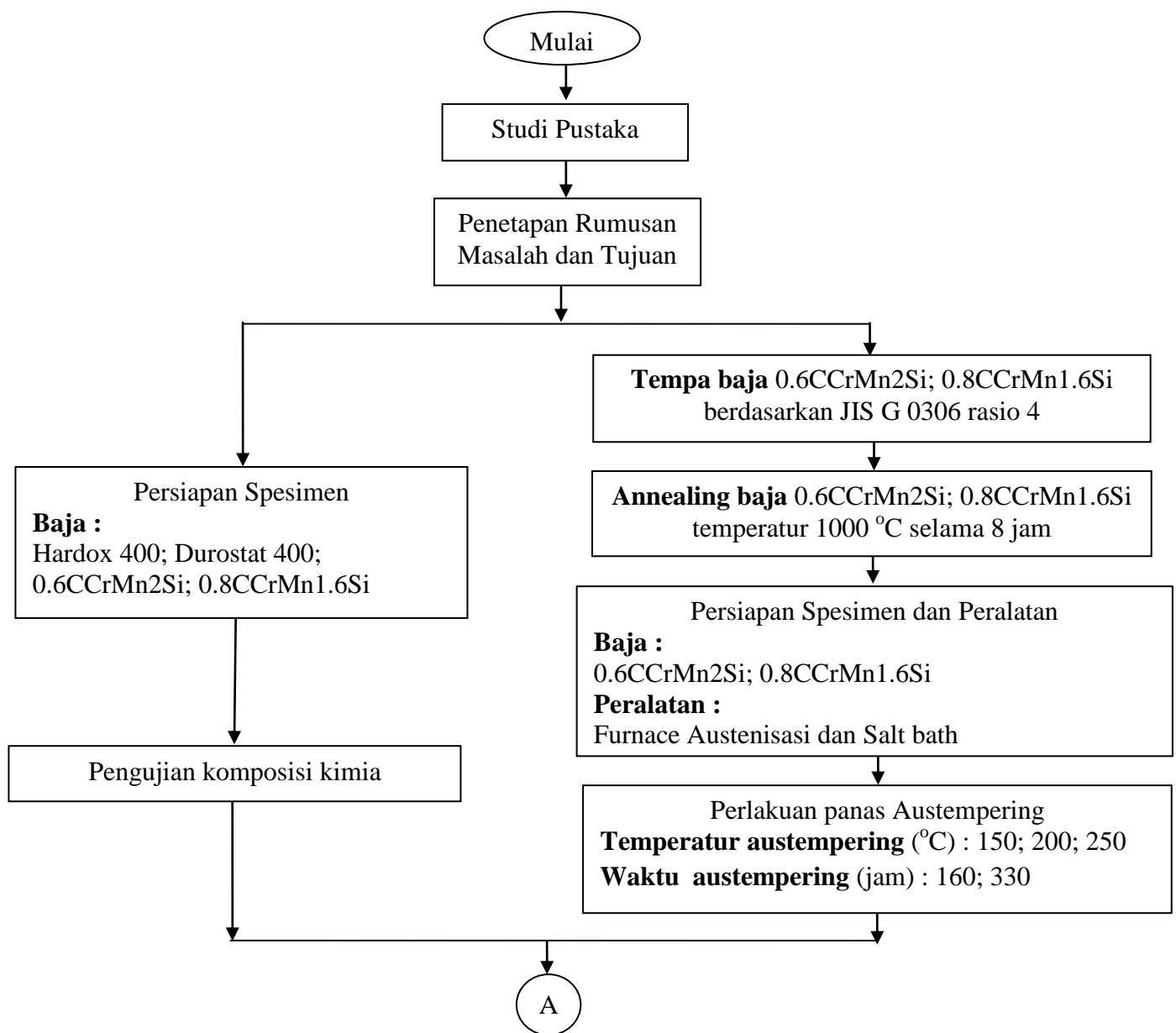


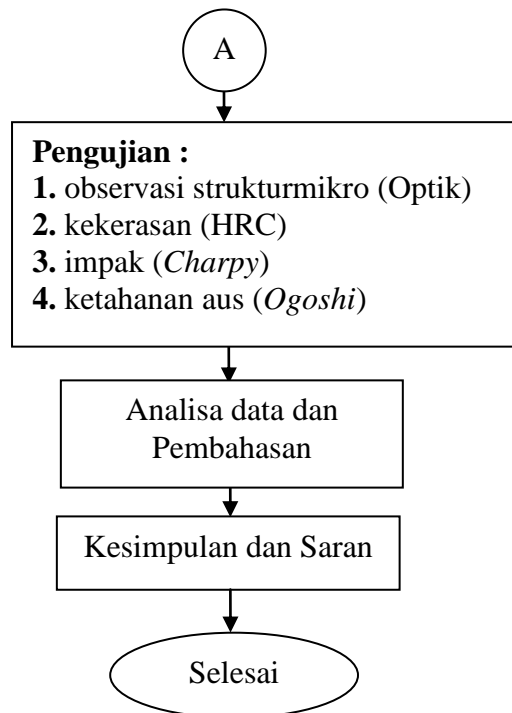
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alir Penelitian

Tahapan penelitian disusun agar penelitian yang akan dilakukan terarah pada tujuan penelitian. Gambar 3.1 berikut ini menunjukkan diagram alir dari penelitian yang akan dilakukan.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Material

- Baja *Hardox* 400 dan *Durostat* 400 sebagai pembanding
- Baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si sebagai baja eksperimen dengan komposisi kimia sesuai Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi kimia baja pembanding dan baja eksperimen

Baja	Paduan (%) berat					
	C	Si	Mn	Cr	P	S
<i>Hardox</i> 400	0.15	0.45	1.2	0.03	0.01	0.001
<i>Durostat</i> 400	0.13	0.35	1.5	0.4	0.01	0.001
0.6CCrMn2Si	0.6	2	2	1	<0.002	<0.002
0.8CCrMn1.6Si	0.8	1.6	2	1	<0.002	<0.002



3.3 Peralatan Penelitian

1. Dapur Pemanas (*furnace*)

Merupakan jenis tungku elektrik tipe *internal heater* merek *Nabertherm* di jurusan teknik mesin ITS (Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Dapur pemanas (*furnace*) austenisasi

2. Dapur *salt bath*

Merupakan dapur elektrik tipe *external heated* di jurusan teknik mesin ITS (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 Dapur *salt bath* proses austempering

3. *Salt bath*

Komposisi yang digunakan 40% KNO_3 dan 60% NaNO_2 (% berat)[15].

4. Peralatan Potong

Peralatan digunakan untuk membentuk spesimen uji komposisi kimia, impak, kekerasan, observasi strukturmikro dan ketahanan aus adalah gergaji mesin,



mesin bubut, mesin skrap dan WEDM di jurusan teknik mesin ITS (Gambar 3.4).



Gambar 3.4 Gergaji mesin dan WEDM

5. Peralatan pendukung

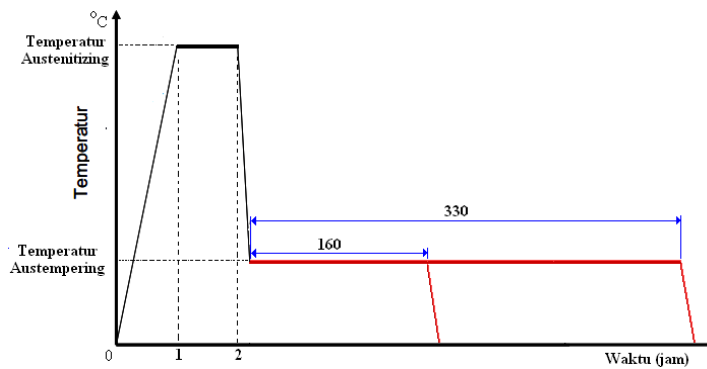
Penggunaan sarung tangan, pelindung badan dan masker untuk melindungi operator dari paparan temperatur tinggi selama proses perlakuan (Gambar 3.5).



Gambar 3.5 Masker dan perlengkapan keselamatan.

3.4 Proses Austempering

Spesimen baja dipanaskan di temperatur austenisasi dan ditahan selama 1 jam, kemudian didinginkan cepat ke temperatur austempering dan ditahan lalu didinginkan udara. Proses tersebut dituangkan dalam skema Gambar 3.6 dengan variasi temperatur dan waktu austempering di Tabel 3.2.



Gambar 3.6 Skema perlakuan panas austempering pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si

Tabel 3.2 Rancangan percobaan proses austempering pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si

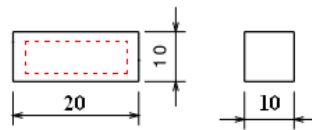
Baja	Temperatur austenisasi (°C)	Proses austempering	
		Temperatur (°C)	Waktu penahann (Jam)
0.6CCrMn2Si	1000	150	160
			330
		200	160
			330
		250	160
			330
0.8CCrMn1.6Si	1000	150	160
			330
		200	160
			330
		250	160
			330



3.5 Pengujian

3.5.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan terhadap baja *Hardox 400* dan *Durostat 400* serta baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si. Spesimen uji dibentuk sesuai Gambar 3.7 dan desain eksperimen sesuai Tabel 3.3. Pengujian berdasarkan standar ASTM E 32 menggunakan spektrometer di Polteknik Perkapalan Negeri Surabaya (Gambar 3.8).



Gambar 3.7 Dimensi dan permukaan uji spesimen komposisi kimia (mm)



Gambar 3.8 Mesin spektrometer uji komposisi kimia

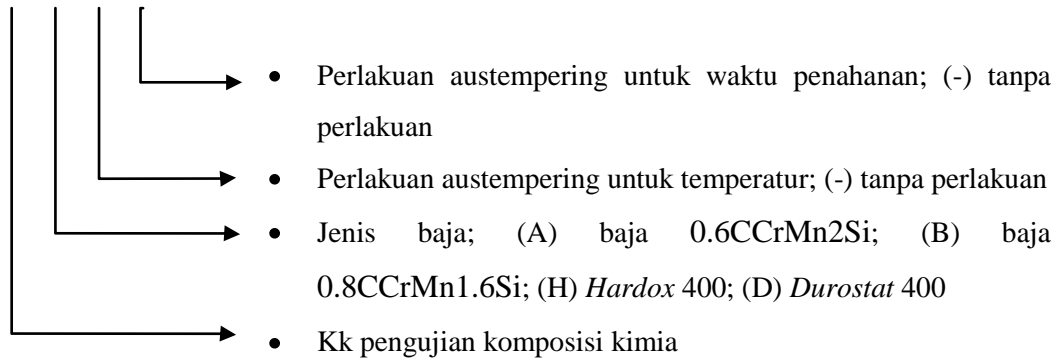
Tabel 3.3 Desain eksperimen komposisi kimia

Baja	Kode penamaan hasil pengujian komposisi kimia (% berat)								
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Mo	B
<i>Hardox 400</i>	Kk/H/-/-								
<i>Durostat 400</i>	Kk/D/-/-								
0.6CCrMn2Si (A)	Kk/A/-/-								
0.8CCrMn1.6Si (B)	Kk/B/-/-								



Note kode penamaan :

Kk / x / x / x



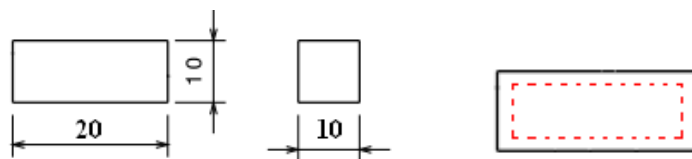
Contoh : **Kk/H/-/-** artinya adalah

Pengujian komposisi kimia/baja *Hardox*/tanpa perlakuan austempering temperatur/tanpa perlakuan austempering waktu penahanan

3.5.2 Observasi Strukturmikro

Observasi strukturmikro dilakukan terhadap baja *Hardox* 400 dan *Durostat* 400 serta baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si sebelum dan setelah perlakuan panas. Spesimen uji dibentuk sesuai Gambar 3.9 dan desain observasi pada Tabel 3.4. Pengamatan menggunakan alat mikroskop optik *Olympus* di jurusan teknik mesin ITS (Gambar 3.10). Observasi berdasarkan standar ASTM E 407 dengan prosedur sebagai berikut :

1. Pemotongan spesimen dengan gergaji mesin dan WEDM
2. Penghalusan permukaan uji dengan kertas gosok *grit* 80; 220; 500;1000 dan 2000
3. Penghalusan permukaan uji dengan kain bludru dan alumina
4. Pengetsaan dengan *nital* (2% HNO_3 + 98 % Alkohol, % volume)
5. Pengamatan mikroskop dengan pembesaran 1000X



Gambar 3.9 Dimensi dan permukaan spesimen observasi strukturmikro (mm)



Gambar 3.10 Mesin *grinding polishing* dan mikroskop *Olympus* dalam observasi strukturmikro

Tabel 3.4 Desain observasi strukturmikro

Baja	Perlakuan austempering		Kode penamaan hasil observasi strukturmikro		
			Pembesaran (100X)	Pembesaran (500X)	Pembesaran (1000X)
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)			
<i>Hardox</i>	-	-	Sm/H/-/-/1	Sm/H/-/-/5	Sm/H/-/-/10
<i>Durostat</i>	-	-	Sm/D/-/-/1	Sm/D/-/-/5	Sm/D/-/-/10
0.6CCrMn2Si	-	-	Sm/A/-/-/1	Sm/A/-/-/5	Sm/A/-/-/10
	150	160	Sm/A/15/16/1	Sm/A/15/16/5	Sm/A/15/16/10
		330	Sm/A/15/33/1	Sm/A/15/33/5	Sm/A/15/33/10
	200	160	Sm/A/20/16/1	Sm/A/20/16/5	Sm/A/20/16/10
		330	Sm/A/20/33/1	Sm/A/20/33/5	Sm/A/20/33/10
	250	160	Sm/A/25/16/1	Sm/A/25/16/5	Sm/A/25/16/10
		330	Sm/A/25/33/1	Sm/A/25/33/5	Sm/A/25/33/10
0.8CCrMn1.6Si	-	-	Sm/B/-/-/1	Sm/B/-/-/5	Sm/B/-/-/10
	150	160	Sm/B/15/16/1	Sm/B/15/16/5	Sm/B/15/16/10
		330	Sm/B/15/33/1	Sm/B/15/33/5	Sm/B/15/33/10
	200	160	Sm/B/20/16/1	Sm/B/20/16/5	Sm/B/20/16/10
		330	Sm/B/20/33/1	Sm/B/20/33/5	Sm/B/20/33/10
	250	160	Sm/B/25/16/1	Sm/B/25/16/5	Sm/B/25/16/10
		330	Sm/B/25/33/1	Sm/B/25/33/5	Sm/B/25/33/10



Note kode penamaan :

Sm /x/ x/ x/x

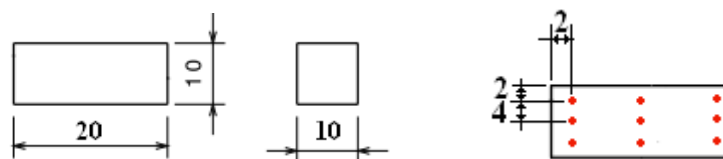
- Pembesaran; (1) 100X; (5) 500X; (10) 1000X
- Perlakuan austempering untuk waktu penahanan; (-) tanpa perlakuan; (16) 160 jam; (33) 330 jam
- Perlakuan austempering untuk temperatur; (-) tanpa perlakuan; (15) 150 °C; (20) 200 °C; (25) 250 °C.
- Jenis baja; (A) baja 0.6CCrMn2Si ; (B) baja 0.8CCrMn1.6Si; (H) *Hardox* 400; (D) *Durostat* 400
- Sm observasi strukturmikro

Contoh : **Sm/A/15/33/1** artinya adalah

Observasi strukturmikro/baja tipe A/temperatur austempering 150°C/waktu penahanan austempering 330 jam/pembesaran 100x

3.5.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan terhadap baja *Hardox* 400 dan *Durostat* 400 serta baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si sebelum dan setelah perlakuan panas. Spesimen uji dibentuk sesuai Gambar 3.11. dan desain eksperimen pada Tabel 3.5. Pengujian berdasarkan standar JIS Z 2245 menggunakan *rockwell* pada mesin uji *Hamburg* (Gambar 3.12) dengan beban 150 Kpa di jurusan teknik mesin ITS.



Gambar 3.11 Dimensi dan titik indentasi pada permukaan uji spesimen kekerasan (mm)



Gambar 3.12 Mesin uji kekerasan *rockwell*

Tabel 3.5 Desain eksperimen uji kekerasan

Baja	Perlakuan austempering		Kode penamaan hasil pengujian kekerasan (HRC)
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	1-9
<i>Hardox</i>	-	-	Hr/H/-/-/x
<i>Durostat</i>	-	-	Hr/D/-/-/x
0.6CCrMn2Si	-	-	Hr/A/-/-/x
	150	160	Hr/A/15/16/x
		330	Hr/A/15/33/x
	200	160	Hr/A/20/16/x
		330	Hr/A/20/33/x
	250	160	Hr/A/25/16/x
		330	Hr/A/25/33/x
0.8CCrMn1.6 Si	-	-	Hr/B/-/-/x
	150	160	Hr/B/15/16/x
		330	Hr/B/15/32/x
	200	160	Hr/B/20/16/x
		330	Hr/B/20/33/x
	250	160	Hr/B/25/16/x
		330	Hr/B/25/33/x



Note kode penamaan :

Hr /x/x/x/x

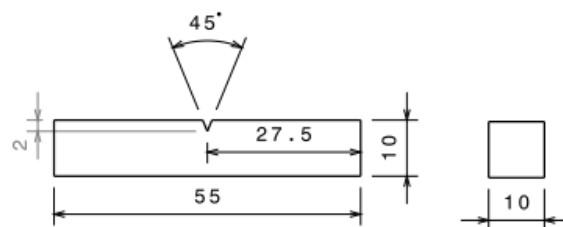
- Titik indentasi 9 titik
- Perlakuan austempering untuk waktu penahanan; (-) tanpa perlakuan; (16) 160 jam; (33) 330 jam
- Perlakuan austempering untuk temperatur; (-) tanpa perlakuan; (15) 150 °C; (20) 200 °C; (25) 250 °C.
- Jenis baja; (A) baja 0.6CCrMn2Si ; (B) baja 0.8CCrMn1.6Si; (H) *Hardox* 400; (D) *Durostat* 400
- Hr pengujian kekerasan

Contoh : **Hr/B/20/16/3** artinya adalah

Pengujian kekerasan/baja tipe B/temperatur austempering 200⁰C/waktu penahanan austempering 160 jam/titik indentasi ke-3

3.5.4 Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan terhadap baja *Hardox* 400 dan *Durostat* 400 serta baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si sebelum dan setelah perlakuan panas. Spesimen uji dibentuk sesuai Gambar 3.13 dan desain eksperimen pada Tabel 3.6. Pengujian berdasarkan standar JIS Z 2242 menggunakan metode *Charpy* pada mesin uji *Frank* (Gambar 3.13) dengan beban 30 Kg di jurusan teknik mesin ITS.



Gambar 3.13 Dimensi spesimen impak (mm)



Gambar 3.14 Mesin uji impak

Tabel 3.6 Desain pengujian impak

Baja	Perlakuan austempering		Kode penamaan hasil pengujian impak (kJ/m ²)	
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	1	2
<i>Hardox</i>	-	-	Ip/H/-/-/1	Ip/H/-/-/2
<i>Durostat</i>	-	-	Ip/D/-/-/1	Ip/D/-/-/2
0.6CCrMn2Si	-	-	Ip/A/-/-/1	Ip/A/-/-/2
	150	160	Ip/A/15/16/1	Ip/A/15/16/2
		330	Ip/A/15/33/1	Ip/A/15/33/2
	200	160	Ip/A/20/16/1	Ip/A/20/16/2
		330	Ip/A/20/33/1	Ip/A/20/33/2
	250	160	Ip/A/25/16/1	Ip/A/25/16/2
		330	Ip/A/25/33/1	Ip/A/25/33/2
0.8CCrMn1.6Si	-	-	Ip/B/-/-/1	Ip/B/-/-/2
	150	160	Ip/B/15/16/1	Ip/B/15/16/2
		330	Ip/B/15/33/1	Ip/B/15/33/2
	200	160	Ip/B/20/16/1	Ip/B/20/16/2
		330	Ip/B/20/33/1	Ip/B/20/33/2
	250	160	Ip/B/25/16/1	Ip/B/25/16/2
		330	Ip/B/25/33/1	Ip/B/25/33/2



Note kode penamaan :

Ip / x / x / x / x

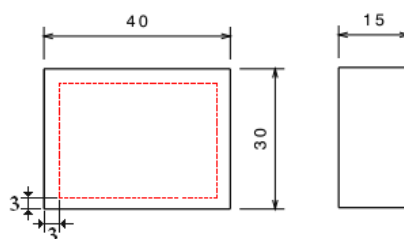
- Repetisi; (1) pertama; (2) kedua
- Perlakuan austempering untuk waktu penahanan; (-) tanpa perlakuan; (16) 160 jam; (33) 330 jam
- Perlakuan austempering untuk temperatur; (-) tanpa perlakuan; (15) 150 °C; (20) 200 °C; (25) 250 °C.
- Jenis baja; (A) baja 0.6CCrMn2Si ; (B) baja 0.8CCrMn1.6Si; (H) *Hardox* 400; (D) *Durostat* 400
- Ip pengujian impak

Contoh : **Ip/A/15/33/2** artinya adalah

Pengujian impak/baja tipe A/temperatur austempering 150⁰C/waktu penahanan austempering 330 jam/pengulangan ke-2

3.5.5 Pengujian Ketahanan Aus

Pengujian ketahanan aus dilakukan terhadap baja *Hardox* 400 dan *Durostat* 400 serta baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si sebelum dan setelah perlakuan panas. Spesimen uji dibentuk sesuai Gambar 3.15 dan desain eksperimen pada Tabel 3.7. Pengujian berdasarkan standar ASTM G99 menggunakan mesin uji *Ogoshi* (Gambar 3.16) di Universitas Indonesia Depok Jakarta.



Gambar 3.15 Dimensi dan permukaan uji spesimen ketahanan aus (mm)



Gambar 3.16 Mesin uji ketahanan aus *Ogoshi*

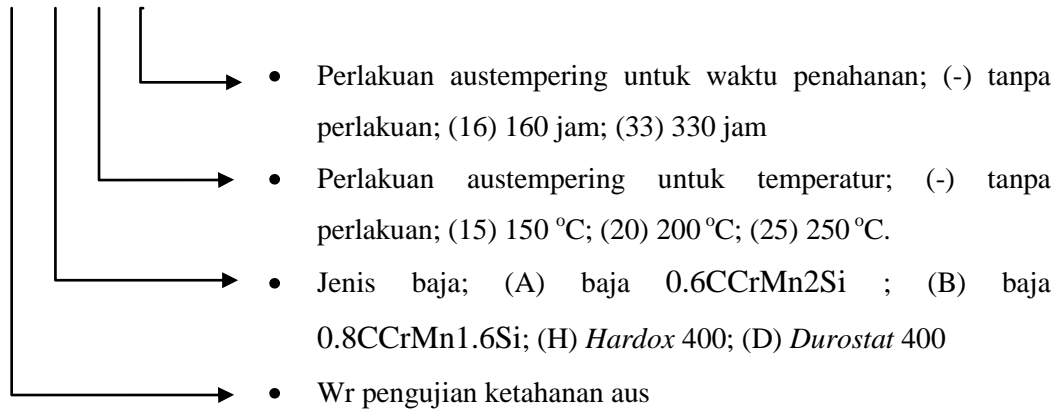
Tabel 3.7 Desain pengujian *wear resistance*

Baja	Perlakuan austempering		Kode penamaan hasil pengujian <i>wear resistance</i> (--)
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	
<i>Hardox</i>	-	-	Wr/H/-/-
<i>Durostat</i>	-	-	Wr/D/-/-
0.6CCrMn2Si (A)	-	-	Wr/A/-/-
	150	160	Wr/A/15/16
		330	Wr/A/15/33
	200	160	Wr/A/20/16
		330	Wr/A/20/33
	250	160	Wr/A/25/16
		330	Wr/A/25/33
0.8CCrMn1.6Si (B)	-	-	Wr/B/-/-
	150	160	Wr/B/15/16
		330	Wr/B/15/33
	200	160	Wr/B/20/16
		330	Wr/B/20/33
	250	160	Wr/B/25/16
		330	Wr/B/25/33



Note kode penamaan :

Wr / x / x / x



Contoh : **Wr/A/20/33** artinya adalah

Pengujian ketahanan aus/baja tipe A/temperatur austempering 200⁰C/waktu penahanan austempering 330 jam.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Sebelum Perlakuan Austempering

Pengujian spesimen baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si dilakukan sebelum perlakuan austempering. Pengujian dibutuhkan untuk mengetahui karakteristik baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si. Pengujian berupa komposisi kimia, kekerasan dan observasi struktur mikro terhadap baja 0.8CCrMn1.6Si, 0.6CCrMn2Si, *Hardox* dan *Durostat* pada berbagai perlakuan. Perlakuan annealing, normalising, quenching terhadap baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si serta tanpa perlakuan terhadap baja *Hardox* dan *Durostat*.

4.1.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia (spektrometer) terhadap baja 0.8CCrMn1.6Si, 0.6CCrMn2Si, *Hardox* dan *Durostat* pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi kimia baja 0.8CCrMn1.6Si; 0.6CCrMn2Si; *Hardox* dan *Durostat*

Baja	Paduan (% berat)							
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	Ti
Baja 0.8CCrMn1.6Si	0.78	1.66	1.89	1.24	0.03	0.01	0.05	0.01
Baja 0.6CCrMn2Si	0.65	2.01	1.84	1.27	0.02	0.01	0.04	0.01
<i>Hardox</i> 400	0.16	0.42	1.27	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02
<i>Durostat</i> 400	0.12	0.35	1.39	0.41	0.01	0.01	0.02	0.02

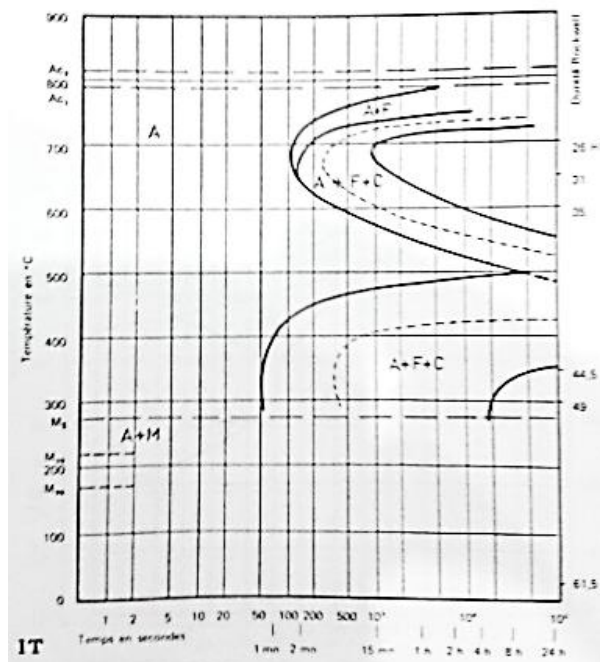
Baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si merupakan baja karbon tinggi yaitu 0.8% & 0.6% dengan unsur paduan utama berupa mangan sejumlah 1.8%, kromium



1.24 % dan silikon 1.6 & 2%. Unsur karbon tinggi ditambahkan untuk menurunkan temperatur *martensite start* (M_s) baja. Temperatur M_s turun, maka austempering dapat dilakukan pada temperatur rendah. Kestabilan austenit dan ketahanan aus ditingkatkan dengan menambahkan unsur mangan. Unsur kromium ditambahkan untuk mendapatkan kestabilan fase ferit dalam struktur bainit. Pembentukan sementit (Fe_3C) dicegah dengan penambahan unsur silikon. Baja *Hardox* dan *Durostat* merupakan baja kadar karbon rendah yaitu 0.15% dengan unsur paduan utama berupa mangan sejumlah 1.3%. Karbon rendah untuk meningkatkan ketangguhan dan sifat mampu las. Mangan sebagai penstabil austenit dan meningkatkan ketahanan aus baja.

4.1.1.1 Diagram *Isothermal Trasformation* dan *Martensite Start*

Analisa diagram *Isothermal Transformation* (IT) baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si menggunakan baja referensi dengan unsur yang sama. Baja referensi yang digunakan adalah JIS 45 SCD 6 Steel (0.5%C; 1.05%Mn; 1.48%Si; 1.20Cr) [20] pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram IT baja JIS 45 SCD 6 (0.5%C;1.05%Mn;1.48%Si;1.20Cr) [20]



Pada IT diagram baja 45 SCD 6 diketahui bahwa penambahan unsur paduan telah mengubah bentuk kurva C. Kurva C bergeser ke kanan dan terpisah membentuk hidung (*nose*) dan lutut (*knee*). Pergeseran kurva memungkinkan baja untuk diproses austempering. Pada proses austempering perubahan fase austenit dihindari hingga mencapai temperatur transformasi yaitu mendekati *martensite start* (Ms).

Temperatur *martensite start* (Ms) baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si didapatkan dengan dua cara yaitu menggunakan metode perhitungan persamaan (2.1) dan program *Map Steel* [16]. Pada Tabel 4.2 dilampirkan nilai Ms hasil perhitungan persamaan 2.1 dan program *Map Steel* baja 0.8CCrMn1.6Si, 0.6CCrMn2Si dan beberapa baja referensi.

Tabel 4.2 Temperatur Ms hasil perhitungan persamaan 2.1 dan program *Map Steel* baja 0.8CCrMn1.6Si, 0.6CCrMn2Si dan baja referensi

Baja	Reverensi (°C)	Hasil Program (°C)	Hasil Perhitungan (°C)
	Ms	Ms	Ms
0.6CCrMn2Si	-	173	180
0.8CCrMn1.6Si	-	94	160
AISI 1050	330	304	307
AISI 4140	350	348	349
AISI 9261	250	246	238
Fe-Cr	270	270	262
1CSi	165	118	164
0.6C	217	163	200
0.6CCr	240	209	239

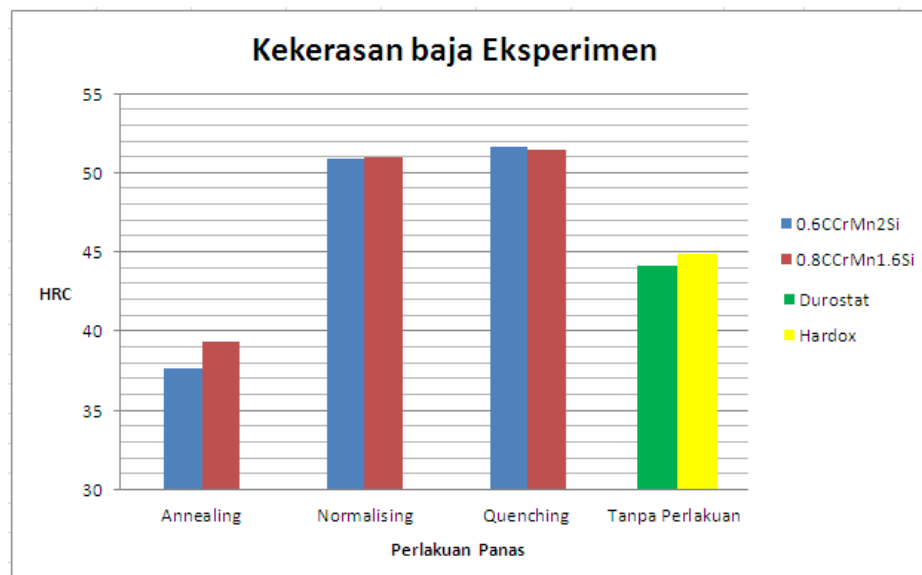
Sumber baja referensi : *Atlas of Time Temperatur Diagrams for Iron and Steel* [20] dan *Novel Nanostructured Bainitic Steel Grades To Answer The Need For High-Performance Steel Components* [3]



Nilai M_s hasil perhitungan dan program pada baja referensi mendekati nilai diagram IT, maka diharapkan dapat memberikan nilai M_s yang akurat terhadap baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si. Nilai M_s pada baja 0.8CCrMn1.6Si adalah 160 °C dan 0.6CCrMn2Si adalah 180 °C. Temperatur austempering yang digunakan pada penelitian adalah 150, 200 dan 250°C.

4.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan (HRC) baja 0.6CCrMn2Si, 0.8CCrMn1.6Si, *Hardox* dan *Durostat* dengan berbagai perlakuan. Perlakuan annealing, normalising, quenching terhadap baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si, serta tanpa perlakuan terhadap *Hardox* dan *Durostat* seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik nilai kekerasan (HRC) terhadap baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si perlakuan annealing, normalising dan quenching serta *Hardox* dan *Durostat* tanpa perlakuan.

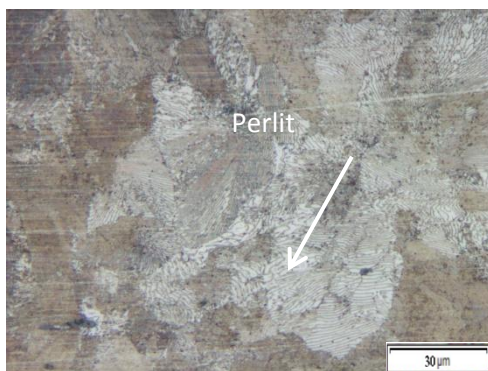


Kekerasan baja 0.6CCrMn2Si annealing 38 HRC, normalising 51 HRC dan quenching 52 HRC. Kekerasan baja 0.8CCrMn1.6Si annealing 39 HRC, normalising 51 HRC dan quenching 52 HRC. Baja *Hardox* dan *Durostat* memiliki kekerasan masing-masing 45 HRC dan 44 HRC (Gambar 4.2)

Annealing dengan struktur perlit yang lunak. Pada pendinginan lebih cepat seperti normalising dan quenching kekerasan baja relatif sama. Karbon tinggi dan unsur paduan menurunkan temperatur *martensite start* (M_s). Temperatur M_s rendah membatasi pembentukan struktur martensit, sehingga mengurangi kekerasan yang dapat dicapai. Pendekatan nilai kekerasan (HRC) berdasarkan ASTM A 255 untuk 100% dan 50% martensit. Kekerasan baja 0.6CCrMn2Si adalah 61 HRC untuk 100% martensit dan 52 HRC untuk 50% martensit. Kekerasan baja 0.8CCrMn1.6Si adalah 65 HRC untuk 100% martensit dan 52 HRC untuk 50% martensit. Maka diduga pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil proses normalising dan quenching memiliki 50 % fase martensit.

4.1.3 Observasi Strukturmikro

Oberservasi strukturmikro baja 0.6CCrMn2Si, 0.8CCrMn1.6Si perlakuan annealing, normalising dan quenching, serta *Hardox* dan *Durostat* tanpa perlakuan dengan pembesaran 1000x dan etsa nital 2%.



(0.8CCrMn1.6Si)

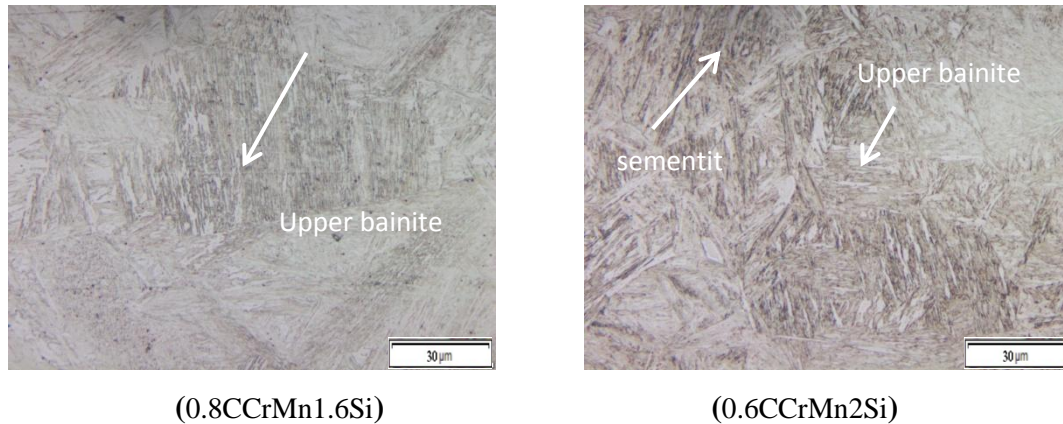


(0.6CCrMn2Si)

Gambar 4.3 Strukturmikro baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si perlakuan annealing.

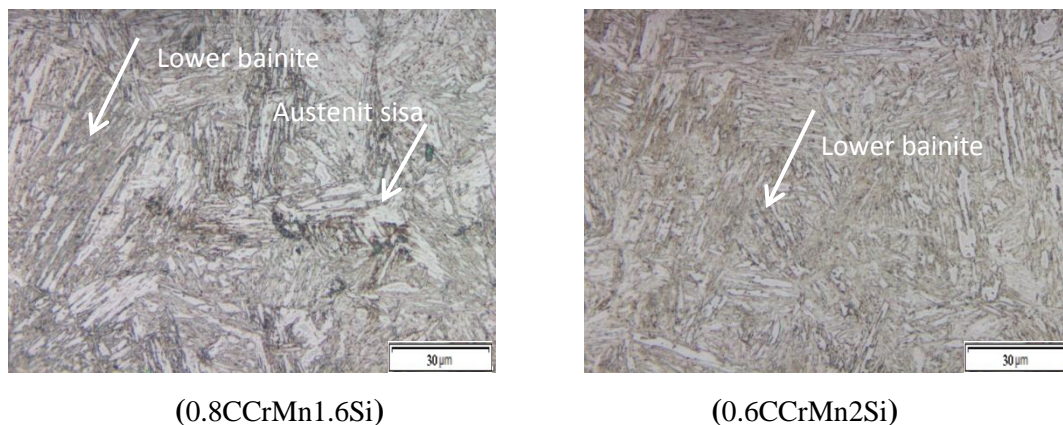


Struktur lamellar perlit pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing (Gambar 4.3). Pada baja annealing 0.8CCrMn1.6Si jumlah struktur lamellar terbentuk lebih banyak karena mendekati komposisi *eutectoid*.



Gambar 4.4 Strukturmikro baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si perlakuan normalizing.

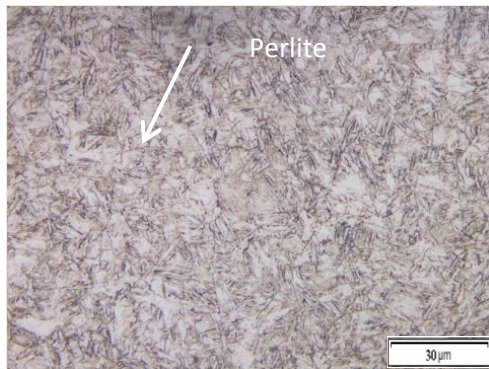
Struktur *upper bainite* pada baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si hasil normalising (Gambar 4.4). Baja 0.6CCrMn2Si juga memiliki struktur lain yang tampak lebih gelap diduga adalah sementit dan perlit.



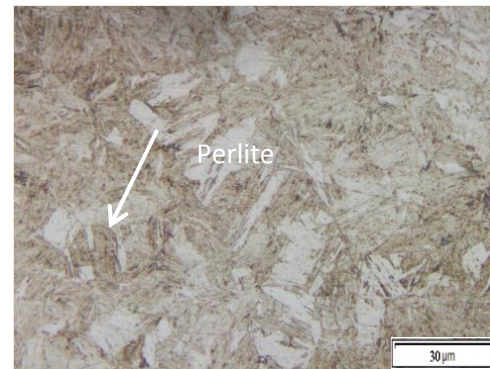
Gambar 4.5 Strukturmikro baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si perlakuan quenching.



Struktur *lower bainite* (Gambar 4.5) pada baja 0.8CCrMn1.6Si dan 0.6CCrMn2Si hasil quenching, namun diduga juga terdapat struktur martensit. Baja 0.8CCrMn1.6Si terlihat memiliki jumlah austenit sisa (putih) lebih banyak.



(*Hardox*)



(*Durostat*)

Gambar 4.6 Strukturmikro baja *Hardox* dan *Durostat* tanpa perlakuan.

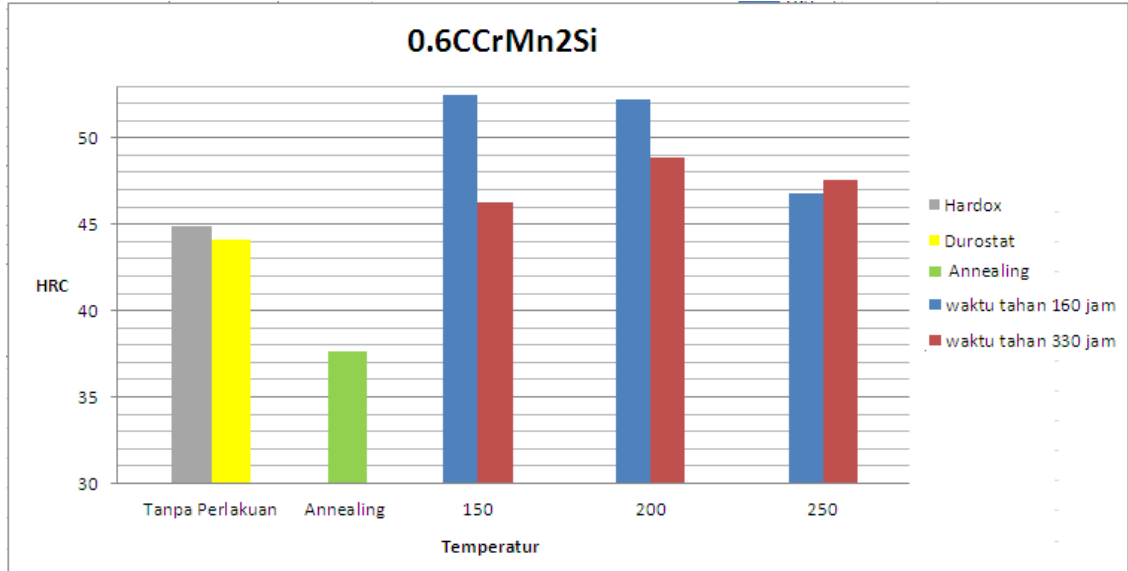
Strukturmikro perlit dan austenit sisa ditemukan pada baja *hardox* dan *durostat* (Gambar 4.6). Penempatan pada fase austenit bertujuan untuk memperoleh struktur halus perlit dan mencegah terbentuknya fase martensit yang keras dan getas.

4.2 Pengujian Setelah Perlakuan Austempering

Pengujian baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering serta baja *Hardox* dan *Durostat* tanpa perlakuan. Pengujian berupa kekerasan, kekuatan impak, keausan dan observasi strukturmikro.

4.2.1 Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan baja 0.6CCrMn2Si terhadap hasil annealing dan austempering temperatur 150; 200; 250 °C serta waktu tahan 160; 330 jam, kemudian baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Nilai kekerasan (HRC) baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu tahan), kemudian baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan.

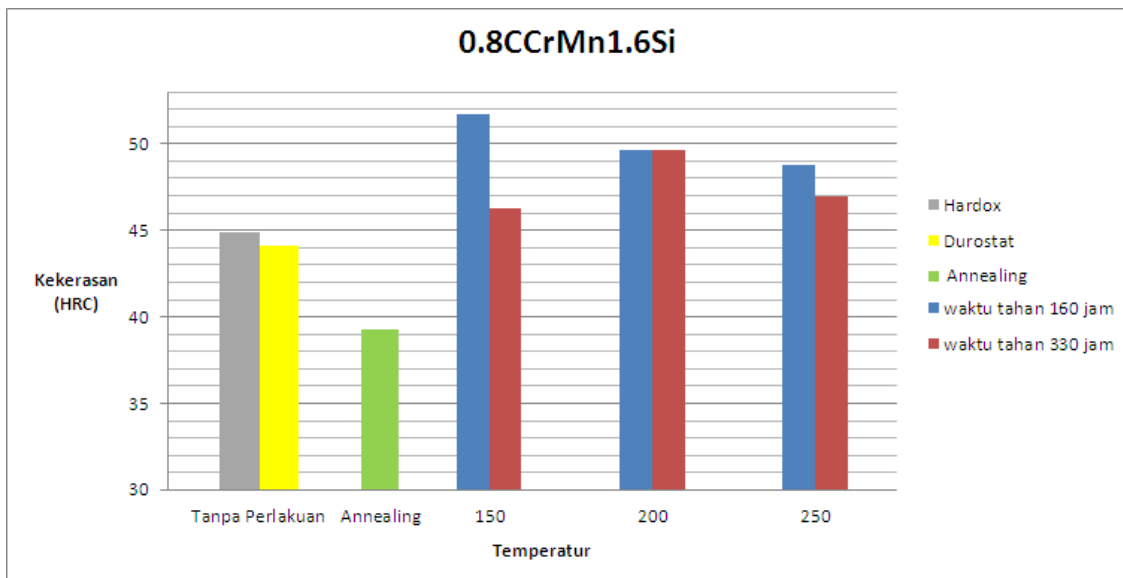
Baja annealing 0.6CCrMn2Si memiliki kekerasan 37 HRC. Waktu tahan 160 jam pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150 °C dan 200 °C memiliki kekerasan sama yaitu 52 HRC. Temperatur austempering 250 °C baja 0.6CCrMn2Si memiliki kekerasan 46 HRC. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekerasan 46 HRC. Temperatur austempering 200 °C baja 0.6CCrMn2Si memiliki kekerasan 49 HRC, dan temperatur austempering 250 °C memiliki kekerasan 47 HRC.

Kekerasan baja austempering 0.6CCrMn2Si memiliki kecenderungan meningkat terhadap penurunan temperatur austempering karena jumlah struktur bainit yang terbentuk. Semakin rendah temperatur austempering, maka semakin banyak jumlah struktur bainit yang terbentuk. Kekerasan naik dengan semakin banyak struktur yang terbentuk. Kekerasan berkurang dengan bertambahnya waktu tahan karena difusi pada ferit lewat jenuh. Ferit lewat jenuh berdifusi keluar menuju



austenit sisa sehingga dislokasi dalam ferit berkurang. Penurunan dislokasi pada ferit menurunkan kekerasan baja.

Hasil pengujian kekerasan baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering temperatur 150; 200; 250 °C dan waktu penahanan 160; 330 jam, kemudian *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan pada Gambar 4.8



Gambar 4.8 Nilai kekerasan (HRC) baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu tahan), kemudian baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan.

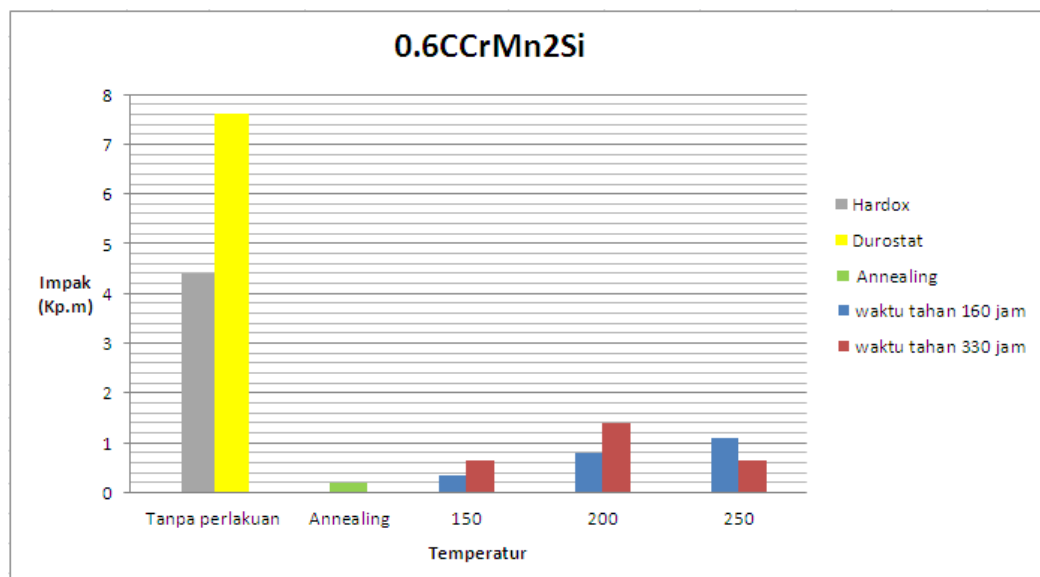
Baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing mencapai kekerasan 38 HRC. Waktu tahan 160 jam pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekerasan 52 HRC, temperatur austempering 200 °C memiliki kekerasan 50 HRC, temperatur austempering 250°C memiliki kekerasan 49 HRC. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekerasan 46 HRC, temperatur austempering 200 °C memiliki kekerasan 49 HRC, temperatur austempering 250 °C memiliki kekerasan 47 HRC.



Kekerasan baja 0.8CCrMn1.6Si memiliki kecenderungan meningkat seiring penurunan temperatur austempering karena jumlah struktur bainit yang terbentuk. Struktur bainit yang terbentuk meningkat pada temperatur austempering rendah. Kekerasan meningkat dengan bertambahnya jumlah struktur bainit. Penurunan kekerasan baja dengan bertambahnya waktu tahan karena distribusi karbon dari ferit lewat jenuh ke austenit. Distribusi karbon menurunkan dislokasi pada ferit lewat jenuh. Kekerasan turun dengan berkurangnya dislokasi ferit lewat jenuh.

4.2.2 Hasil Pengujian Impak

Pengujian impak baja 0.6CCrMn2Si terhadap hasil annealing dan temperatur austempering 150; 200; 250 °C serta waktu penahan 160; 330 jam, kemudian baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan pada Gambar 4.9. Pola patah pada baja 0.6CCrMn2Si hasil annealing dan temperatur austempering 200 °C , waktu tahan 160 jam dan 330 jam (Gambar 4.10)



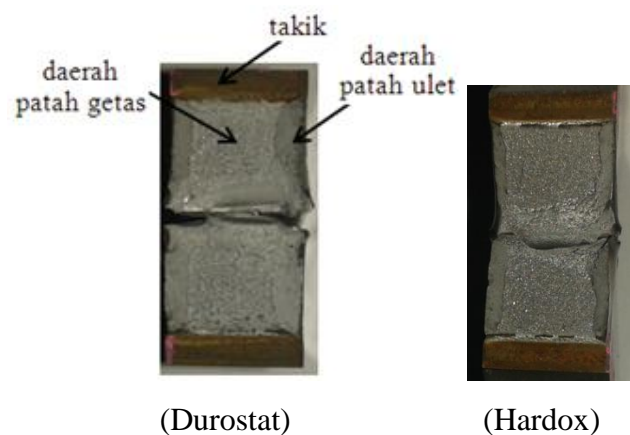
Gambar 4.9 Nilai impak baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan austempering (temperatur 150; 200; 250 °C; waktu penahanan 160; 330 jam), serta baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan.



Baja *Hardox* dan *Durostat* memiliki kekuatan impact 4.6 Kp.m. dan 7.6 Kp.m. Baja 0.6CCrMn2Si hasil annealing memiliki kekuatan impact 0.2 Kp.m. Waktu tahan 160 jam pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekuatan impact 0.3 Kp.m, temperatur austempering 200 °C memiliki kekuatan impact 0.8 Kp.m, temperatur austempering 250 °C memiliki kekuatan impact 1.1 Kp.m. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekuatan impact 0.6 Kp.m, temperatur austempering 200 °C memiliki kekuatan impact 1.4 Kp.m, temperatur austempering 250 °C memiliki kekuatan impact 0.6 Kp.m.

Waktu tahan 160 jam pada baja 0.6CCrMn2Si memiliki kekuatan impact yang cenderung meningkat seiring kenaikan temperatur austempering karena bertambahnya fase austenit. Fase austenit memiliki sifat ketangguhan yang baik pada temperatur ruang. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.6CCrMn2Si memiliki kekuatan impact yang cenderung meningkat karena distribusi karbon oleh ferit supersaturated ke austenit sisa. Kekuatan impact meningkat dengan bertambahnya kandungan karbon pada austenit, meskipun jumlahnya turun.

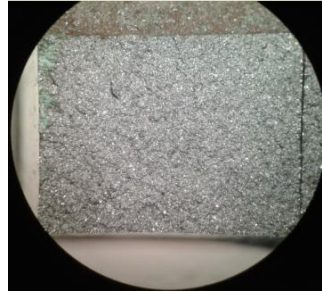
Rendahnya nilai impact baja 0.6CCrMn2Si hasil austempering diduga karena segregasi yang dibuktikan dengan uji SEM (Gambar 4.21) dan cacat pengecoran pada pola patahan.



Gambar 4.10 Pola patahan baja *Durostat* dan *Hardox*.

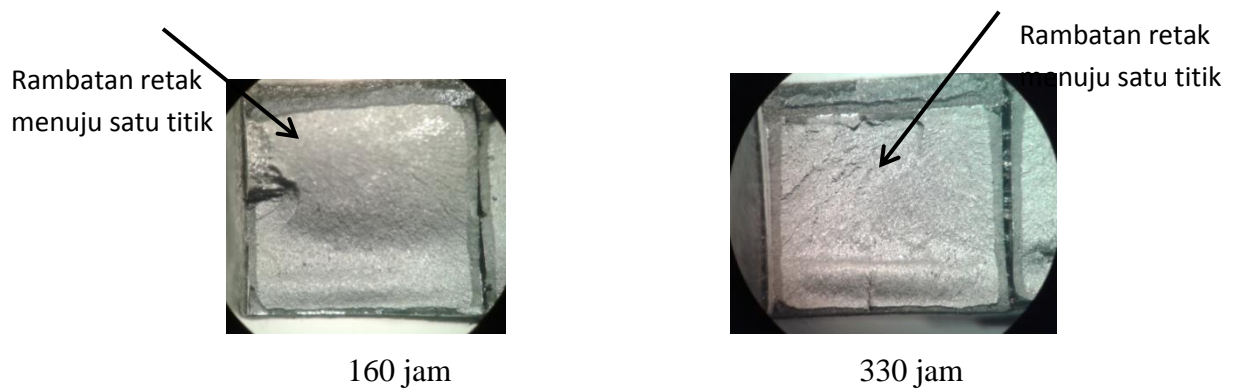


Baja *Hardox* dan *Durostat* memiliki pola patah ulet berupa deformasi plastis di bagian tepinya dan pola patah getas di bagian tengah spesimen (Gambar 4.10). Baja *Durostat* memiliki pola patahan ulet lebih luas dibandingkan *Hardox*, hal tersebut menunjukkan kekuatan impak yang lebih tinggi.



Gambar 4.11 Pola patahan getas baja 0.6CCrMn2Si hasil annealing

Baja 0.6CCrMn2Si hasil annealing memiliki pola patah getas berupa butiran kasar dan mengkilap diseluruh permukaan (Gambar 4.11). Pola patahan ulet tidak dimiliki oleh baja 0.6CCrMn2Si, hal tersebut menunjukkan kekuatan impak yang kurang.

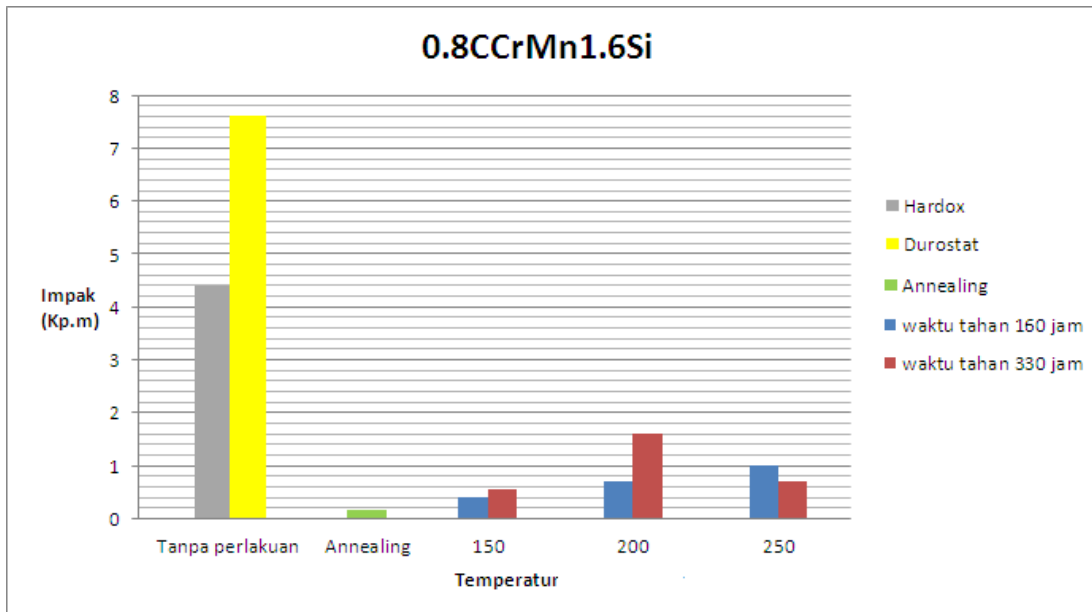


Gambar 4.12 Pola patahan getas baja austempering 0.6CCrMn2Si temperatur 200°C, waktu tahan 160 dan 330 jam.



Baja 0.6CCrMn2Si hasil austempering temperatur 200 °C dengan waktu tahan 160 dan 330 jam memiliki pola patahan getas. Pola patahan getas berupa garis rambatan retak yang menuju satu titik (Gambar 4.12) di sebagian besar permukaan. Pola patahan ulet pada baja 0.6CCrMn2Si ditemukan di bagian tepi yang tipis, maka kekuatan impact baja 0.6CCrMn2Si hasil austempering lebih tinggi dibandingkan hasil annealing.

Pengujian impact baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan temperatur austempering 150; 200; 250 °C serta waktu tahan 160; 330 jam, kemudian *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Nilai impact baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu penahanan), serta baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan.

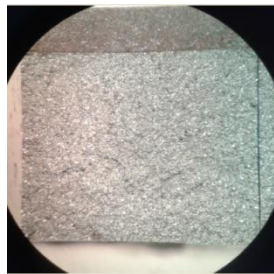
Baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing memiliki kekuatan impact 0.2 Kp.m. Waktu tahan 160 jam pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekuatan impact 0.4 Kp.m, temperatur austempering 200 °C memiliki kekuatan impact 0.7 Kp.m, temperatur austempering 250 °C memiliki



kekuatan impak 1 Kpm. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki kekuatan impak 0.6 Kp.m, temperatur austempering 200 °C memiliki kekuatan impak 1.6 Kp.m, temperatur austempering 250 °C memiliki kekuatan impak 0.7 Kp.m.

Kekuatan impak baja 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering memiliki pola naik seiring kenaikan temperatur austempering diduga karena jumlah fase austenit bertambah. Jumlah austenit sisa meningkat pada temperatur austempering tinggi. Austenit memiliki kekuatan impak yang baik pada temperatur ruang. Kenaikkan kekuatan impak pada baja 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering dengan penambahan waktu tahan diduga karena difusi dari ferit lewat jenuh. Difusi ferit lewat jenuh meningkatkan kadar karbon pada austenit sisa sekitar. Kekuatan impak meningkat dengan meningkatnya kadar karbon pada austenit sisa.

Rendahnya kekuatan impak baja 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering karena segregasi berdasarkan hasil uji SEM (Gambar 4.25) dan cacat pengecoran berdasarkan pola patahan.

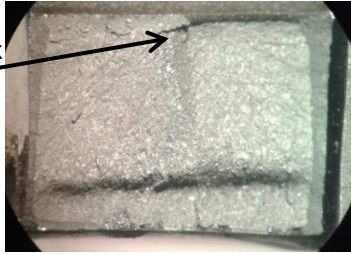


Gambar 4.14 Pola patahan baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing.

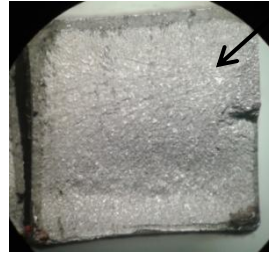
Pola patahan getas pada baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing berupa butiran kasar dan mengkilat diseluruh permukaan (Gambar 4.14). Pola patahan ulet tidak dimiliki oleh baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing terlihat pada kekuatan impak yang rendah.



Rambatan retak
menuju satu titik



160 jam



330 jam

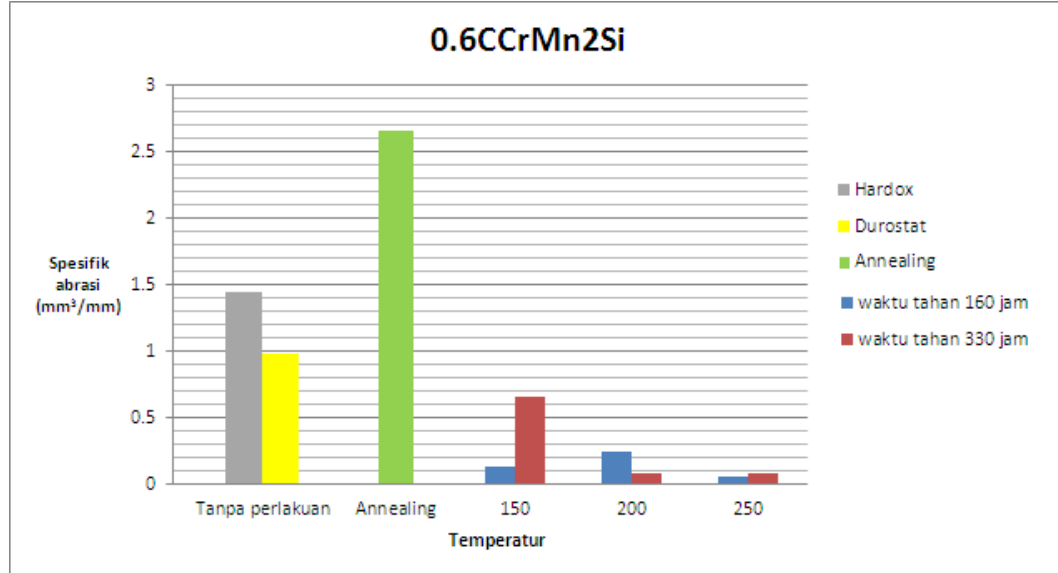
Rambatan retak
menuju satu titik

Gambar 4.15 Pola patahan baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 160 dan 330 jam.

Pola patahan getas berupa alur retakan menuju satu titik pada baja 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering temperatur 200°C dengan waktu tahan 160 dan 330 jam (Gambar 4.15). Pola patahan ulet pada baja 0.8CCrMn1.6Si dimiliki di sisi tepi yang tipis, tampak kekuatan impak hasil austempering lebih tinggi dibandingkan hasil annealing.

4.2.3 Hasil Pengujian Keausan Baja

Hasil pengujian keausan baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan temperatur austempering 150; 200; 250 °C serta waktu penahanan 160; 330 jam, kemudian baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan pada Gambar 4.16.



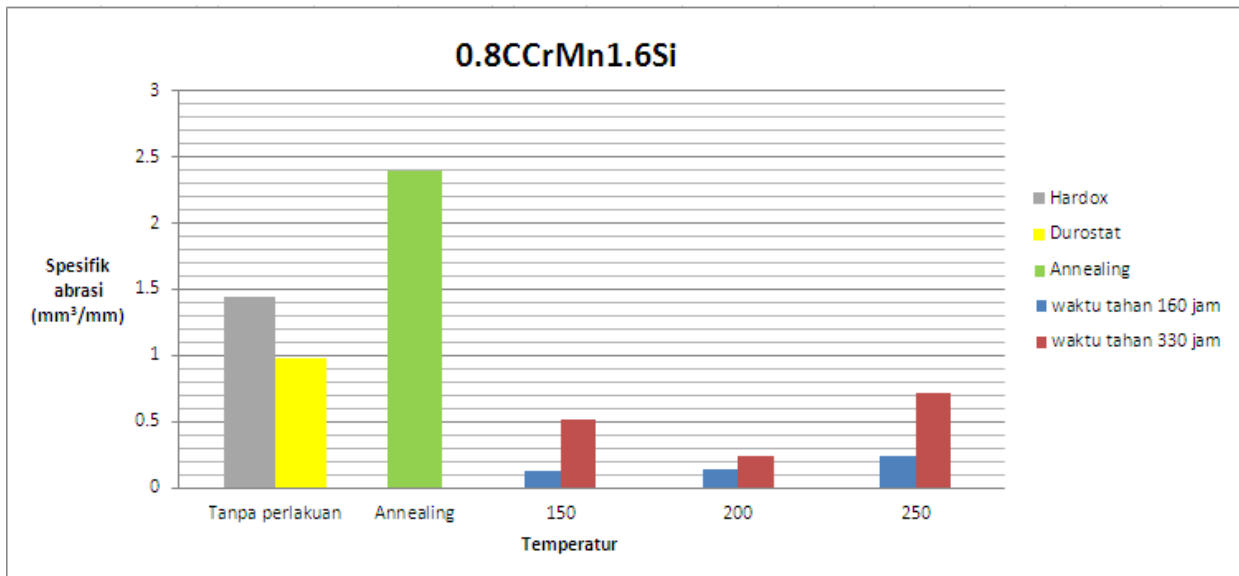
Gambar 4.16 Nilai keausan baja 0.6CCrMn2Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu penahanan), serta baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan.

Kausan baja 0.6CCrMn2Si hasil annealing adalah 2.6 mm³/mm. Waktu tahan 160 jam pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki keausan 0.1 mm³/mm, temperatur austempering 200 °C memiliki keausan 0.2 mm³/mm, temperatur austempering 250 °C memiliki keausan 0.1 mm³/mm. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki keausan 0.6 mm³/mm, temperatur austempering 200 °C memiliki keausan 0.1 mm³/mm, temperatur austempering 250 °C memiliki keausan 0.1 mm³/mm

Kausan pada baja 0.6CCrMn2Si hasil austempering memiliki pola tetap seiring kenaikan temperatur karena struktur bainit dan austenit sisa. Kausan pada baja 0.6CCrMn2Si hasil austempering tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap penambahan waktu tahan, kecuali pada temperatur 150 °C. Nilai keausan dipengaruhi oleh pertumbuhan struktur bainit dan austenit sisa.



Hasil uji keausan baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan temperatur austempering 150; 200; 250 °C serta waktu penahanan 160; 330 jam, kemudian baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Nilai keausan baja 0.8CCrMn1.6Si terhadap annealing dan austempering (temperatur austempering dan waktu penahanan), serta baja *Hardox*, *Durostat* tanpa perlakuan.

Keausan pada baja 0.8CCrMn1.6Si hasil annealing adalah 2.4 mm³/mm. Waktu tahan 160 jam pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki keausan 0.1 mm³/mm, temperatur austempering 200 °C memiliki keausan 0.1 mm³/mm, temperatur austempering 250 °C memiliki keausan 0.2 mm³/mm. Waktu tahan 330 jam pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150 °C memiliki keausan 0.6 mm³/mm, temperatur austempering 200 °C memiliki keausan 0.2 mm³/mm, temperatur austempering 250 °C memiliki keausan 0.7 mm³/mm.

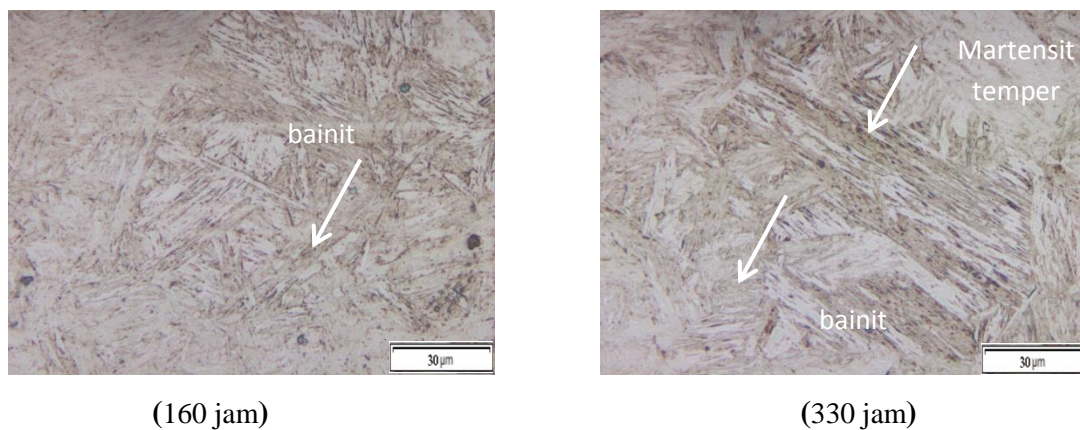
Keausan baja 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering cenderung tetap dengan kenaikan temperatur austempering karena bentuk lath bainit. Keausan baja 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering menurun dengan penambahan waktu tahan



karena karena pertumbuhan austenit sisa. Austenit sisa tumbuh membentuk bloky yang menurunkan ketahanan aus baja.

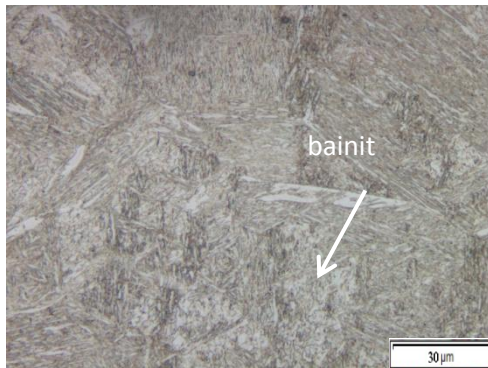
4.2.4 Hasil Observasi Strukturmikro Baja

Observasi strukturmikro pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 150; 200; 250 °C dan waktu tahan 160; 330 jam (Gambar 4.18 - 4.20). Observasi dengan mikroskop optik pembesaran 1000X dan etsa nital 2%.



Gambar 4.18 Baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 150°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.

Temperatur austempering 150 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dengan waktu tahan 160 jam memiliki observasi strukturmikro berupa struktur *lath* bainit. Temperatur austempering 150 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dengan waktu tahan 330 jam memiliki observasi strukturmikro bagian hitam bertambah (Gambar 4.18). Daerah gelap tersebut diduga adalah presipitasi karbida hasil dari martensit tempering karena di austempering dibawah temperatur Ms baja 0.6CCrMn2Si yaitu 180 °C.



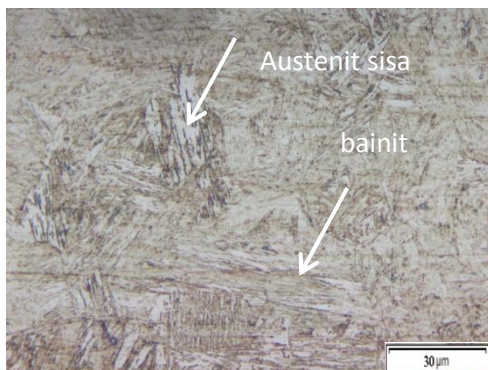
(160jam)



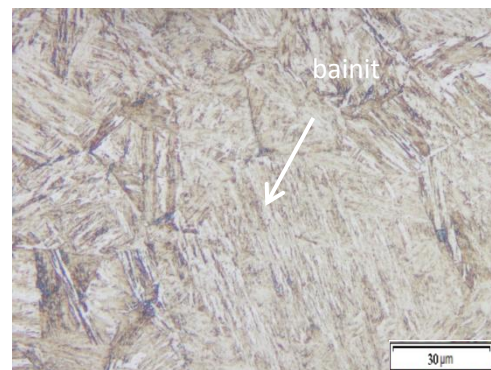
(330jam)

Gambar 4.19 Baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.

Temperatur austempering 200 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dengan waktu tahan 160 jam memiliki observasi strukturmikro berupa bainit halus (daerah gelap) dengan fase austenit (daerah terang) menyebar merata (Gambar 4.19). Temperatur austempering 200 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dengan waktu tahan 330 jam memiliki observasi strukturmikro berupa fase austenit tampak membentuk blok (daerah terang).



(160 jam)

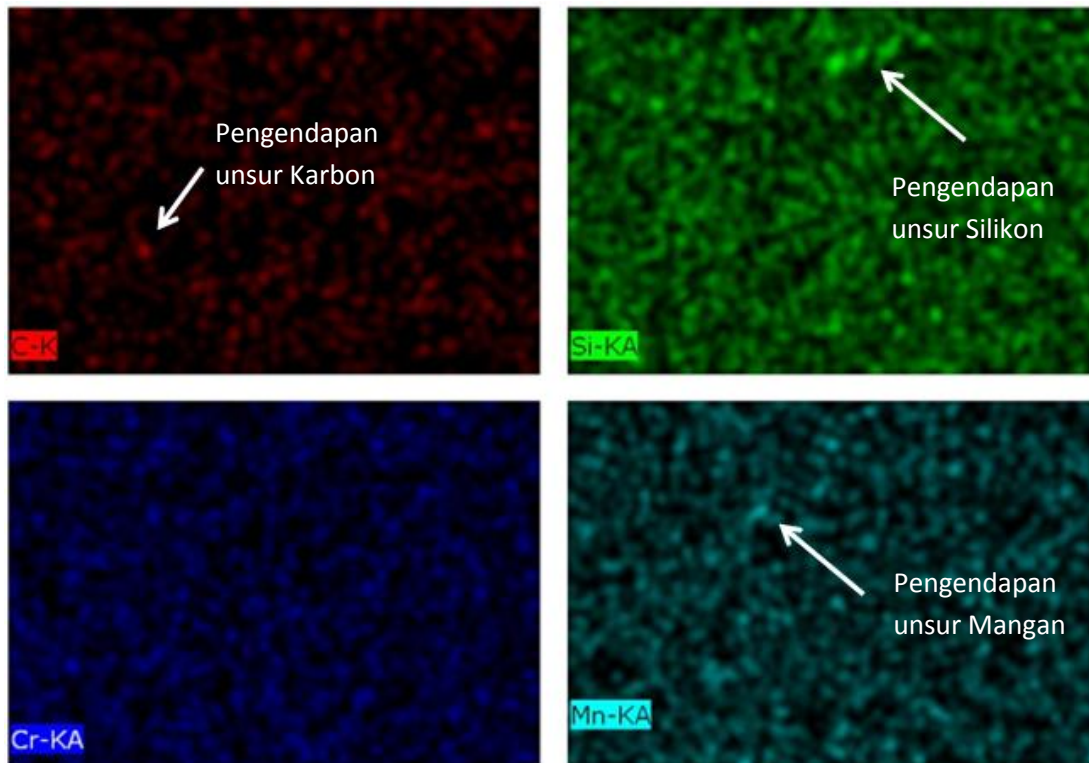


(330 jam)

Gambar 4.20 Baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 250°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.



Temperatur austempering 250 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dengan waktu tahan 160 jam memiliki observasi strukturmikro berupa bainit halus dan austenit sisa (Gambar 4.20). Temperatur austempering 250 °C pada baja 0.6CCrMn2Si dengan waktu tahan 330 jam memiliki observasi strukturmikro berupa Fase austenit (daerah putih) tampak semakin sedikit, namun cenderung membentuk blok.

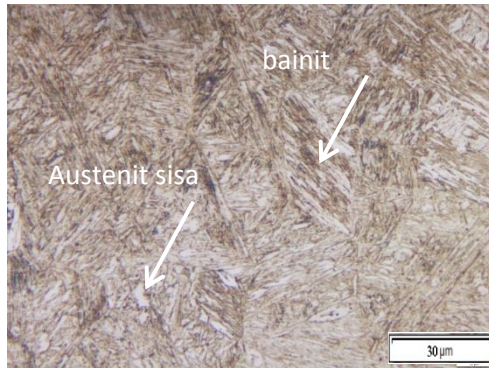


Gambar 4.21 Pengendapan unsur paduan C, Cr, Mn dan Si pada uji SEM baja 0.6CCrMn2Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 330 jam, etsa nital 2%.

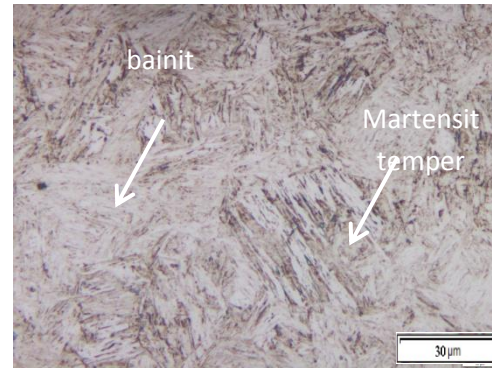
Pengujian SEM pada baja 0.6CCrMn2Si dengan temperatur austempering 200°C dan waktu tahan 330 jam menunjukkan adanya segregasi yaitu pengendapan unsur paduan di beberapa tempat (Gambar 4.21). Proses annealing yang diberikan tidak mampu menghilangkan segregasi tersebut. Segregasi berpengaruh terhadap sifat ketangguhan baja 0.6CCrMn2Si hasil austempering.



Observasi strukturmikro pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 150; 200; 250 °C dan waktu tahan 160; 330 jam. Observasi menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 1000X dan etsa nital 2% pada Gambar 4.22 – 4.24.



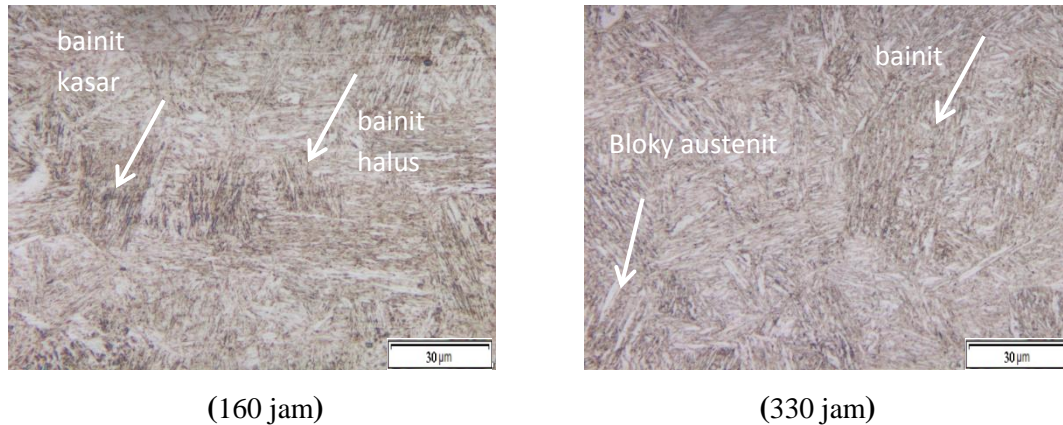
(160 jam)



(330 jam)

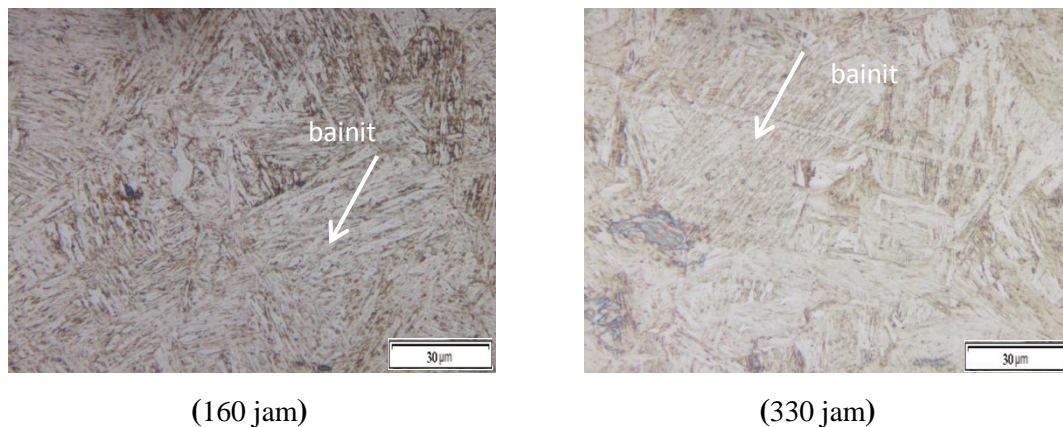
Gambar 4.22 Baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 150°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.

Temperatur austempering 150 °C pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan waktu tahan 160 jam memiliki struktur berupa bainit (gelap) dan austenit sisa (terang) (Gambar 4.22). Temperatur austempering 150 °C pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan waktu tahan 330 jam memiliki struktur berupa bainit dan presipitasi karbida (gelap). Temperatur austempering dibawah temperatur Ms baja 0.8CCrMn1.6Si memiliki struktur presipitasi karbida hasil dari tempering martensit.



Gambar 4.23 Baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.

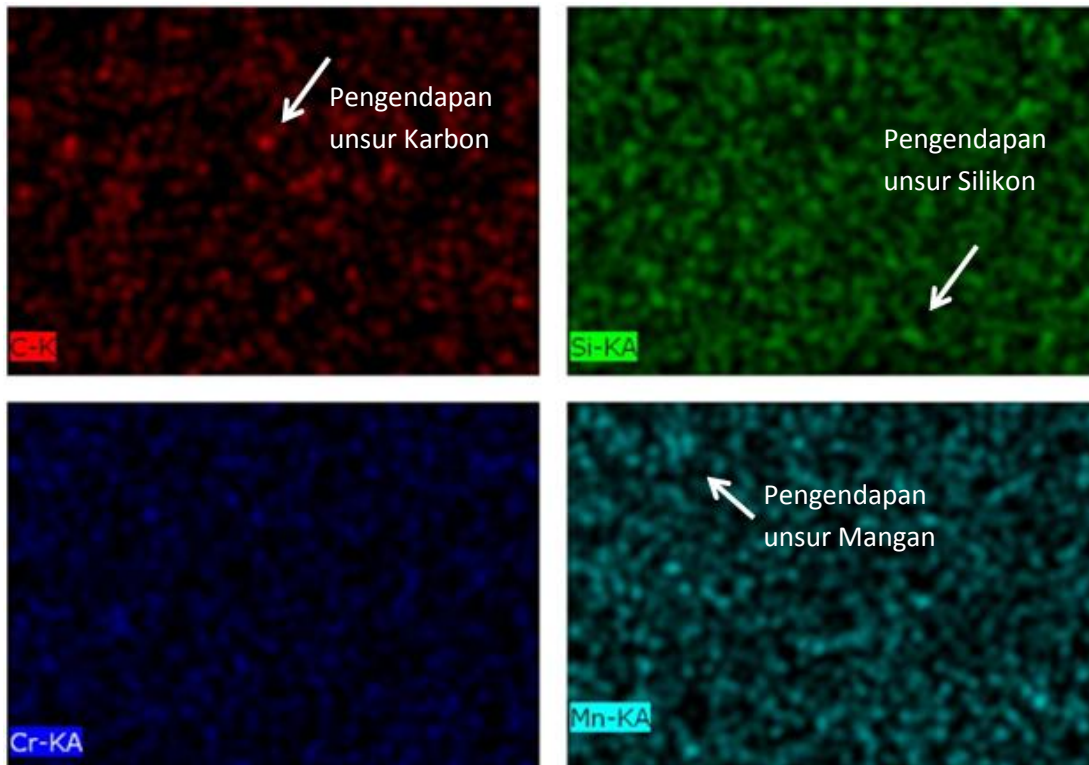
Temperatur austempering 200 °C pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan waktu tahan 160 jam memiliki struktur berupa bainit halus dan kasar. Struktur bainit halus memiliki fase austenit tipis (terang) antara lathnya dan struktur bainit kasar memiliki fase austenit sisa tebal (terang) antara lathnya. Temperatur austempering 200 °C pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan waktu tahan 330 jam memiliki struktur berupa bainit halus bertambah dan muncul blok austenit di beberapa tempat (Gambar 4.23).



Gambar 4.24 Baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 250°C waktu tahan 160 dan 330 jam, etsa nital 2%.



Temperatur austempering 250 °C pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan waktu tahan 160 jam memiliki struktur berupa bainit kasar yaitu fase austenit (terang) yang tebal diantara lath bainit. Temperatur austempering 250 °C pada baja 0.8CCrMn1.6Si dengan waktu tahan 330 jam memiliki struktur berupa bainit kasar (Gambar 4.24).



Gambar 4.25 Segregasi unsur paduan C, Cr, Mn dan Si pada uji SEM baja 0.8CCrMn1.6Si temperatur austempering 200°C waktu tahan 330 jam, etsa nital 2%.

Pengujian SEM terhadap baja 0.8CCrMn1.6Si dengan temperatur austempering 200°C dan waktu tahan 330 menunjukkan adanya segregasi unsur paduan (Gambar 4.25). Proses annealing yang telah diberikan tidak mampu untuk menghilangkan segregasi tersebut. Segregasi berpengaruh terhadap sifat ketangguhan baja 0.8CCrMn1.6Si.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Temperatur austempering di bawah nilai M_s pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si memiliki struktur berupa *lower bainite* dan martensit temper. Temperatur austempering di atas nilai M_s pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si memiliki struktur berupa *lower bainite*, *upper bainite* dan austenit sisa. Struktur bainit meningkat dan austenit sisa berkurang dengan bertambahnya waktu tahan.
2. Kekerasan pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering meningkat dengan turunnya temperatur austempering karena semakin halus dan banyak struktur bainit terbentuk. Kekerasan baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering berkurang dengan bertambahnya panjang waktu tahan karena distribusi karbon dari bainit ke austenit sisa.
3. Kekuatan impak pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering yaitu kurang dari 1 Kp.m untuk setiap temperatur karena oleh struktur lath *lower bainite* dan austenit sisa. Kekuatan impak pada baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering meningkat karena naiknya kadar karbon dari austenit sisa.
4. Keausan baja 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si hasil austempering berkurang dikarenakan oleh struktur lath bainit, austenit sisa dan *solid solution* unsur Mn, Si, Cr.

5.2 Saran

Dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan sifat ketangguhan baja austempering 0.6CCrMn2Si dan 0.8CCrMn1.6Si. Penggunaan TEM (*Transmission Electron Microscopy*) dalam observasi strukturmikro untuk melihat



struktur *bainite free carbide*. Proses peleburan, pengecoran dan pembentukan yang lebih baik untuk mencegah cacat pengecoran dan segregasi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] SSAB (2014), "*Hardox Wear Plate*", SSAB Company, Sweden
- [2] Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe Sir Robert (2006), "*Steel Microstructure and Properties*", Third edition, University of Cambridge
- [3] Sourmail, T. et al (2013), "*Novel Nanostructured Bainitic Steel Grade to Answer the Need for High-Performance Steel Components*", European Union.
- [4] Edward L. Langer (1990), *ASM Handbook Properties and Selection: Iron, Steel and High-Performance Alloy*, 1st edition, The Materials Information Society.
- [5] Avner, Sidney H (1974), "*Introduction to Physical Metallurgy*", City University of New York, United States of America.
- [6] Thelning, Karl-Erik (1974), "*Steel and its Heat Treatment*", Bofors Handbook, Sweden.
- [7] ASM International (1990), *ASM Handbook, Vol 6, "Steel Casting Handbook"*, United States of America.
- [8] Kari L Hennigerl (1991), "*ASM Handbook Heat Treating*", 4th edition, The Materials Information Society.
- [9] Gorni, Antonio Augusto (2015), "*Steel forming and Heat Treating Handbook*", Brazil
- [10] Bhadeshia, H.K.D.H., "*Phase Transformation Group*", Department of Material Science and Metallurgy, University of Cambridge
- [11] Bhadeshia, H.K.D.H. (2001), "*Bainite In Steel Transformation, Microstructure dan Properties*", Second edition, University of Cambridge
- [12] Long, X.Y. dan Kang, J. dan Lv. B. dan Zhang, F.C. (2014), "*Carbide-Free Bainite in Medium Carbon Steel*", Elsevier
- [13] Brooks, Charlie R. (1996), "*Principle of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels*", Department of Material Science and Engineering, University of Tennessee.
- [14] Bhadeshia, H.K.D.H. dkk (2013), "*Three-body abrasive wear of fine pearlite, nanostructured bainite and martensite*", Elsevier.
- [15] Chandler, Harry. (1998), "*Heat Treater's Guide Practice and Procedure for Irons and Steels*", ASM International, The Material Information Society.
- [16] Van Bohemen (2012), "*Bainite and Martensite Start Temperature Calculated With Exponential Carbon Dependence*", Materials Science and Technology
- [17] LIS, A.K & LIS, J. (2006), "*High Strength Hot Rolled And Aged Microalloyed 5% Ni Steel*", Material and Manufacturing Engineering.
- [18] Kunitake, T. (2001), "*Prediction of A_{c3} , A_{c1} and M_s Temperatures by Empirical Formula*", Heat Treating.
- [19] Robert F. Mehl (1972), "*Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*", 7th edition, American Society for Metals.
- [20] G.F. Vander Voort (1984), "*Atlas of Time-Temperature Diagrams for Iron and Steels*", ASM Internasional.



-
- [21] Taylor Lyman (1973), "*Metallography, Structures and Phase Diagrams*", 8th edition, American Society for Metals.
- [22] Bhadeshia, H.K.D.H, Honeycombe R.W.K., (2006), "*Steel Microstructure and Properties*", 3rd edition, Elsevier



LAMPIRAN

Hasil Uji Komposisi Kimia Baja Hardox 400



barata indonesia PT. (PERSERO)

UNIT FOUNDRY GRESIK

Chemical Results

Sample No : 01 Customer : FAISAL
Furnace : Name of Equipment : Hardox 400
Heat No : Order No :
Lab. No : 30042016/00 Material : Low Alloy Steel

Spektralanalyzer Foundry-MASTER									
Grade :									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1	97,9	0,163	0,408	1,25	0,0073	0,0009	0,0284	0,0141	0,0373
2	97,8	0,169	0,436	1,29	0,0080	< 0,0007	0,0300	0,0149	0,0397
Ave	97,9	0,166	0,422	1,27	0,0077	0,0007	0,0292	0,0145	0,0385
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn
1	0,0315	0,0138	0,0088	0,0141	0,0140	0,0043	< 0,0075	< 0,0025	0,0018
2	0,0324	0,0133	0,0097	0,0165	0,0163	0,0054	< 0,0075	< 0,0025	0,0018
Ave	0,0320	0,0136	0,0092	0,0153	0,0152	0,0049	< 0,0075	< 0,0025	0,0018
	B	Ca	Zr	Bi	As	N	Sb		
1	0,0007	0,0006	0,0025	< 0,0050	0,0031	< 0,0050	0,0127		
2	0,0007	0,0008	0,0018	< 0,0050	0,0028	< 0,0050	0,0117		
Ave	0,0007	0,0007	0,0022	< 0,0050	0,0029	< 0,0050	0,0122		

Town : Gresik - Jawa Timur Date : 30/04/2016 Tester : QC. Manager

Jl. VETERAN No. 241 GRESIK 61123
Telp. (031) 3990555 Fax. (031) 3990666
Web: www.barata.co.id e-mail: info@barata.co.id



Hasil Uji Komposisi Kimia Baja Durostat 400



barata indonesia PT. (PERSERO)

UNIT FOUNDRY GRESIK

Chemical Results

Sample No : 02 Customer : FAISAL
Furnace : Name of Equipment : Durostat 400
Heat No : Order No :
Lab. No : 30042016/00 Material : Low Alloy Steel

Spektroanalyzer Foundry-MASTER									
Grade :									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1	97,5	0,126	0,353	1,38	0,0107	< 0,0007	0,420	0,0035	0,0109
2	97,5	0,130	0,351	1,40	0,0102	< 0,0007	0,419	0,0035	0,0105
Ave	97,5	0,128	0,352	1,39	0,0104	< 0,0007	0,419	0,0035	0,0107
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Bb	Sn
1	0,0285	0,0020	0,0145	0,0037	0,0212	< 0,0010	0,0163	0,0044	0,0019
2	0,0290	0,0013	0,0147	0,0044	0,0187	< 0,0010	0,0099	0,0030	0,0020
Ave	0,0287	0,0016	0,0146	0,0040	0,0199	< 0,0010	0,0131	0,0037	0,0020
	B	Ca	Zr	Bi	As	N	Sb		
1	0,0013	0,0002	0,0040	< 0,0050	0,0026	< 0,0050	0,0051		
2	0,0010	0,0004	0,0031	< 0,0050	0,0024	< 0,0050	0,0090		
Ave	0,0011	0,0003	0,0036	< 0,0050	0,0025	< 0,0050	0,0071		

Town : Gresik - Jawa Timur Date : 30/04/2016 Tester : QC. Manager

Jl. VETERAN No. 241 GRESIK 61123
Telp. (031) 3990555 Fax. (031) 3990666
Web: www.barata.co.id e-mail: info@barata.co.id



Hasil Uji Komposisi Kimia Baja 0.8CCrMn1.6Si

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 1 Material : CARBON STEEL
Customer : Sdr. FAISAL (T.MESIN ITS) Dimension : -
Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. : -
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI
Date : 17/06/2016

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	94.0	0.768	1.66	1.89	0.0320	0.0164	1.25	0.0101
2	94.0	0.786	1.65	1.92	0.0333	0.0131	1.24	0.0105
3	94.1	0.796	1.67	1.85	0.0297	0.0118	1.23	0.0126
Ave	94.1	0.783	1.66	1.89	0.0317	0.0138	1.24	0.0111
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0641	0.128	< 0.0050	0.0403	< 0.0050	0.0119	0.0150	0.0183
2	0.0479	0.109	< 0.0050	0.0370	< 0.0050	0.0114	0.0087	0.0107
3	0.0495	0.103	< 0.0050	0.0398	0.0073	0.0102	0.0123	< 0.0050
Ave	0.0538	0.114	< 0.0050	0.0391	< 0.0050	0.0112	0.0120	0.0110
	Pb							
1	0.0142							
2	0.0127							
3	0.0101							
Ave	0.0123							



Hasil Uji Komposisi Kimia Baja 0.6CCrMn2Si

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 2 Material : CARBON STEEL
Customer : Sdr. FAISAL (T.MESIN ITS) Dimension : -
Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. : -
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI
Date: 17/06/2016

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	93.8	0.671	2.04	1.85	0.0236	0.0098	1.27	0.0068
2	93.9	0.638	2.01	1.85	0.0238	0.0091	1.26	0.0092
3	93.9	0.651	1.99	1.83	0.0217	0.0055	1.27	0.0082
Ave	93.9	0.653	2.01	1.84	0.0230	0.0081	1.27	0.0081
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0468	0.0913	< 0.0050	0.0382	0.0156	0.0088	0.0085	0.0370
2	0.0405	0.0883	< 0.0050	0.0320	0.0062	0.0085	0.0070	0.0192
3	0.0504	0.0881	< 0.0050	0.0320	0.0058	0.0109	0.0071	< 0.0050
Ave	0.0459	0.0892	< 0.0050	0.0341	0.0092	0.0094	0.0075	0.0202
	Pb							
1	0.0385							
2	0.0237							
3	0.0080							
Ave	0.0234							



TABEL HASIL PENGUJIAN KEKERASAN

Baja	Perlakuan austempering		Hasil pengujian kekerasan (HRC)								
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Hardox</i>	Tanpa perlakuan		47	44	47	44	46	44	44	47	47
<i>Durostat</i>	Tanpa perlakuan		42	43	44	45	45	45	44	44	45
0.6CCrMn2Si	Quenching		51	52	52	52	52	51	52	52	52
	Normalizing		50	50	51	51	51	51	51	52	51
	Annealing		37	37	36	37	39	39	38	38	38
	150	160	53	52	53	51	51	52	51	52	51
		330	47	45	47	47	48	45	46	47	45
	200	160	51	50	50	50	49	50	49	48	49
		330	48	48	50	50	50	50	50	50	50
	250	160	48	48	47	50	49	49	49	50	49
		330	46	48	46	48	46	48	46	48	47
	Quenching		53	52	50	51	52	51	52	52	50
0.8CCrMn1.6Si	Normalizing		49	50	52	52	49	53	51	51	52
	Annealing		40	38	40	39	38	39	40	40	40
	150	160	52	52	53	52	52	52	51	51	53
		330	47	46	45	47	45	46	47	47	47
	200	160	51	52	52	52	52	52	53	53	53
		330	49	49	48	48	48	48	50	50	50
	250	160	48	48	47	48	45	46	45	47	47
		330	47	47	50	46	47	49	49	47	46
	Quenching		53	52	50	51	52	51	52	52	50
	Normalizing		49	50	52	52	49	53	51	51	52



TABEL HASIL PENGUJIAN IMPAK

Baja	Perlakuan austempering		Hasil pengujian impak (kJ/m ²)		
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	1	2	3
<i>Hardox</i>	Tanpa perlakuan		4.4	4.6	4.6
<i>Durostat</i>	Tanpa perlakuan		6.8	7.4	7.8
0.6CCrMn2Si	Annealing		0.1	0.2	0.3
	150	160	0.4	0.4	0.6
		330	0.6	0.8	0.6
	200	160	0.6	0.6	0.8
		330	1.6	1.4	1.6
	250	160	1	1	0.8
		330	0.6	0.8	0.8
0.8CCrMn1.6Si	Annealing		0.2	0.4	0.2
	150	160	0.4	0.2	0.4
		330	0.6	0.8	0.6
	200	160	1.4	1.2	1.4
		330	0.8	0.8	0.6
	250	160	1.1	0.6	0.8
		330	0.8	0.6	0.8

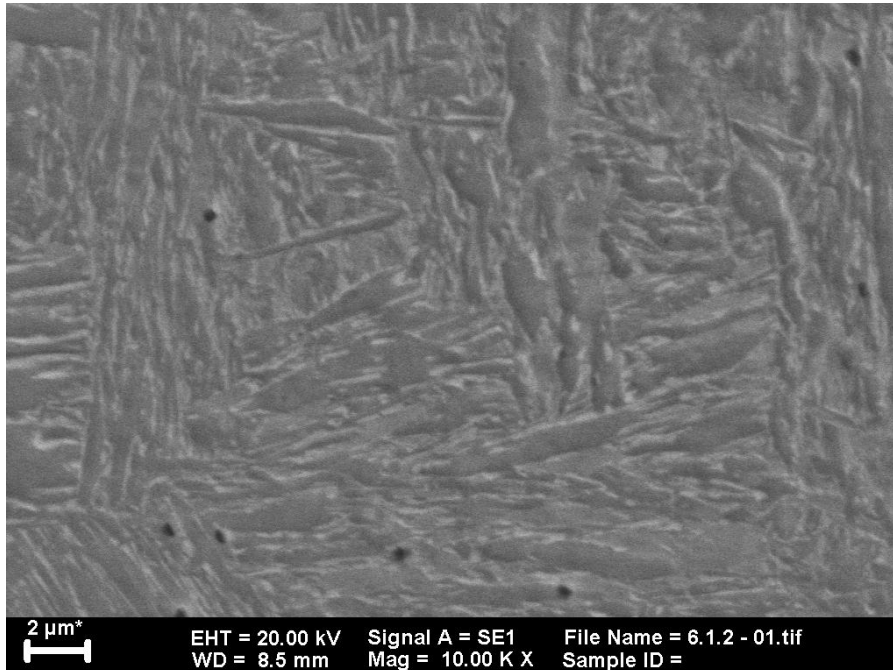


TABEL HASIL PENGUJIAN KEAUSAN

Baja	Perlakuan austempering		Hasil pengujian wear <i>resistance</i> (mm ³ /mm)
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)	
<i>Hardox</i>	Tanpa perlakuan		1.44
<i>Durostat</i>	Tanpa perlakuan		0.98
0.6CCrMn2Si	Annealing		2.66
	150	160	0.14
		330	0.65
	200	160	0.24
		330	0.08
	250	160	0.05
		330	0.07
0.8CCrMn1.6Si	Annealing		1.39
	150	160	0.13
		330	0.52
	200	160	0.14
		330	0.24
	250	160	0.24
		330	0.72



Hasil Pengujian SEM baja 0.6CCrMn2Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam





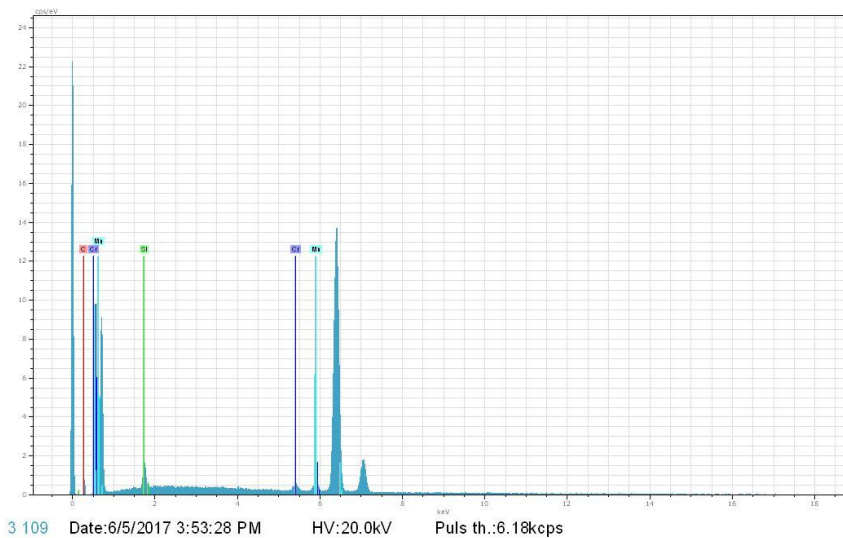
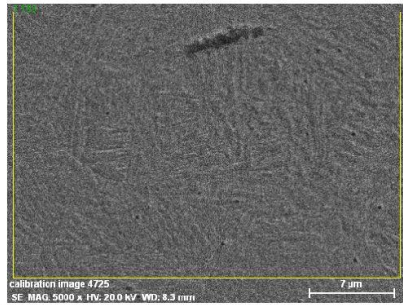
Laporan Pengujian SEM Baja 0.6CCrMn2Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam





Laporan Pengujian SEM Baja 0.6CCrMn2Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam

6.1.2



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	68.84	93.23	83.92	1.9
Si	14	K-series	1.84	2.49	4.39	0.1
C	6	K-series	1.78	2.41	9.91	0.4
Cr	24	K-series	1.38	1.87	1.78	0.2
Total:			73.84	100.00	100.00	

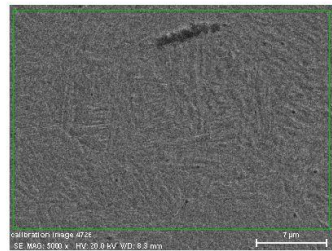
6/5/2017

1. Page

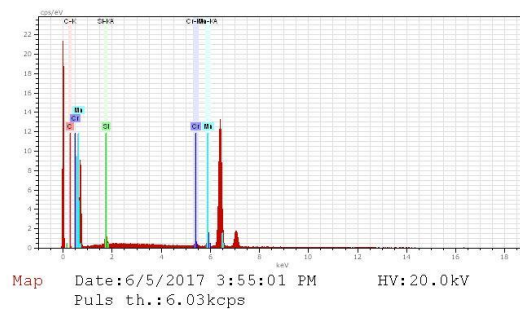


Laporan Pengujian SEM Baja 0.6CCrMn2Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam

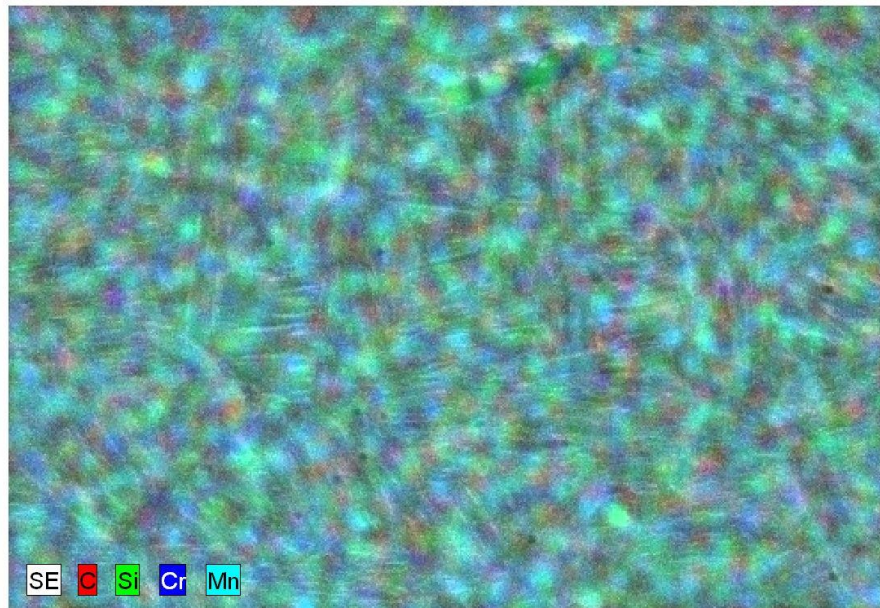
6.1.2



calibration image 4726 Date:6/5/2017 3:52:58
PMImage size:512 x
384Mag:5000xHV:20.0kV

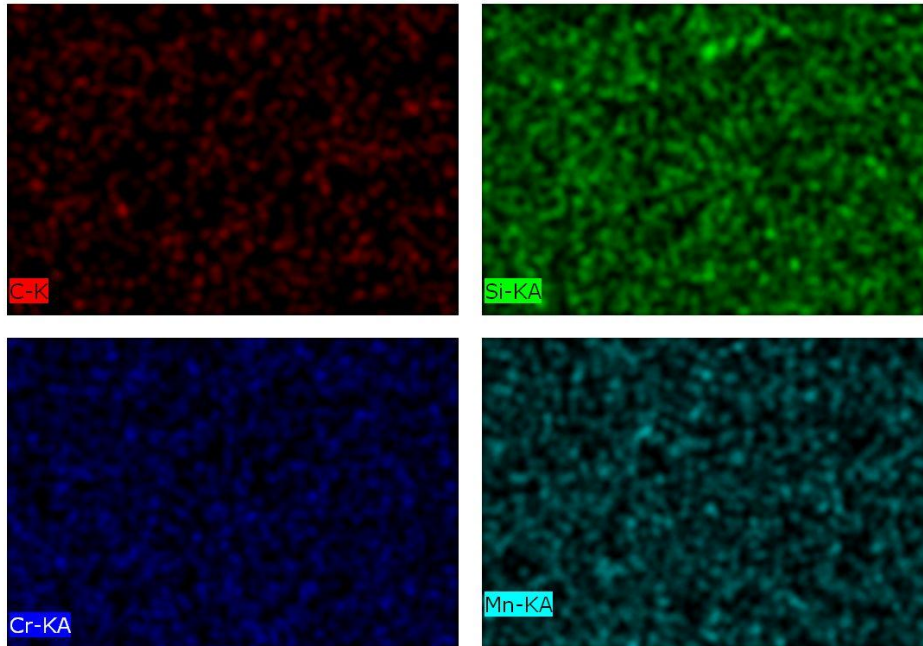


calibration image 21 3713 Date:6/5/2017 3:55:01 PMImage size:496 x
342Mag:5000xHV:20.0kV





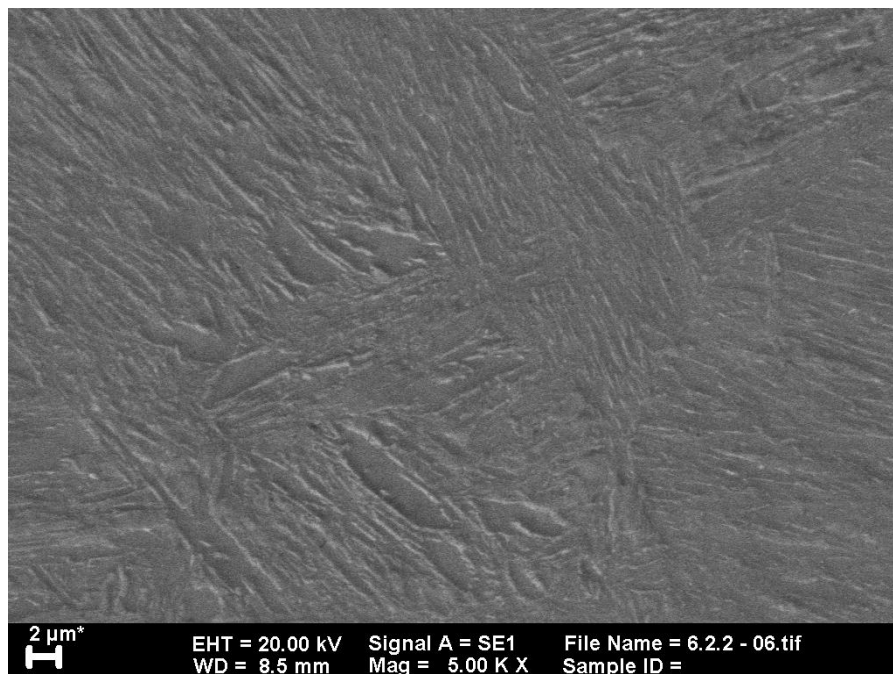
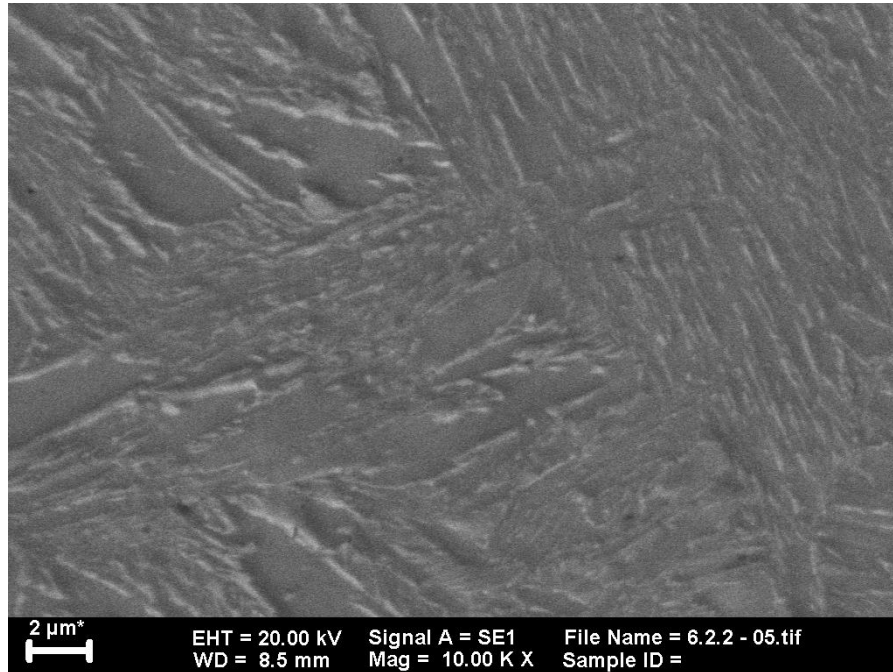
Laporan Pengujian SEM Baja 0.6CCrMn2Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam



C-K, Si-KA, Cr-KA, Mn-KA Date: 6/5/2017 3:55:52 PM
Image size: 496 x 342
Mag: 5000x
HV: 20.0kV

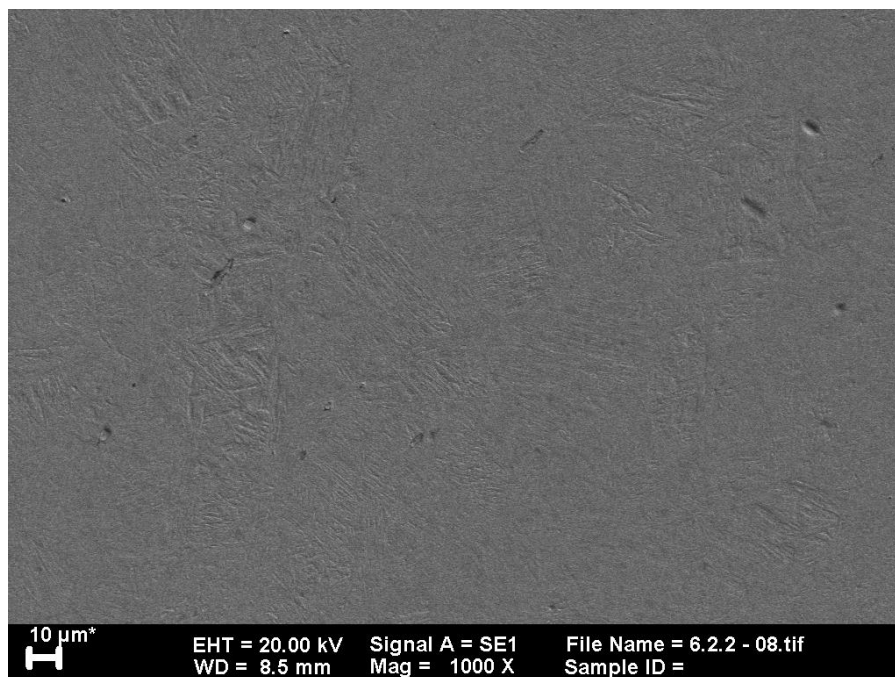
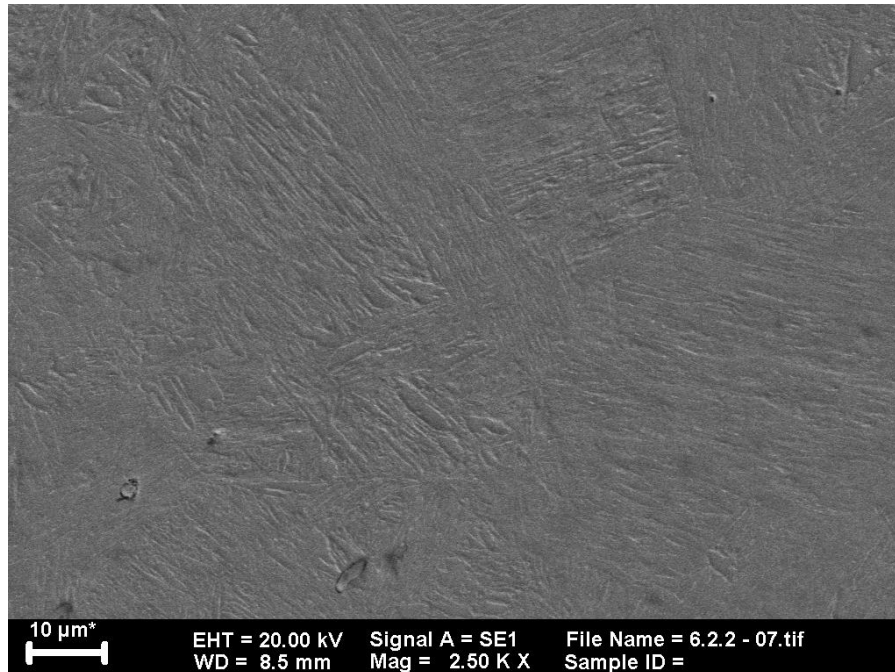


Laporan Pengujian SEM Baja 0.8CCrMn1.6Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam





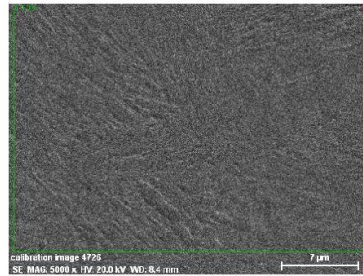
Laporan Pengujian SEM Baja 0.8CCrMn1.6Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam



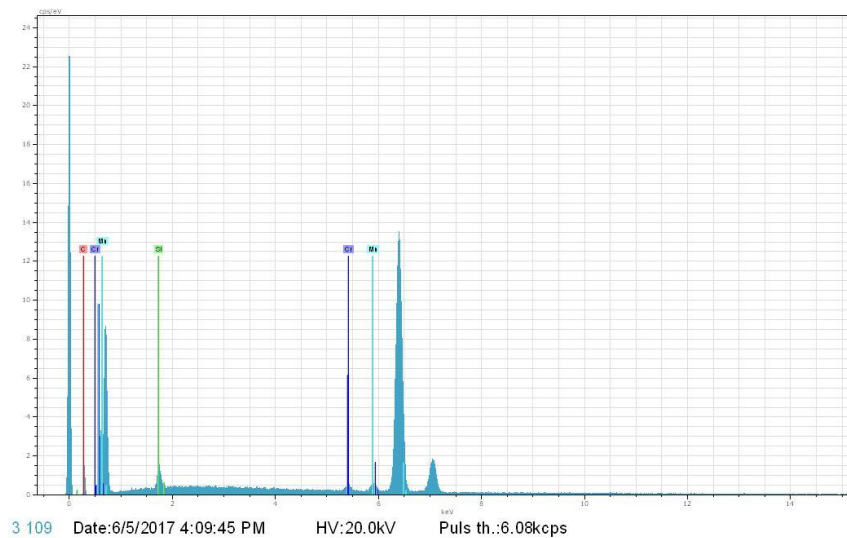


Laporan Pengujian SEM Baja 0.8CCrMn1.6Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam

6.2.2



calibration image 4726 Date: 6/5/2017
4:09:30 PM Image size: 512 x
384 Mag: 5000x HV: 20.0 kV



3 109 Date: 6/5/2017 4:09:45 PM HV: 20.0 kV Puls th.: 6.08 kcps

El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[%]
Mn	25	K-series	67.13	90.80	74.96	1.9
C	6	K-series	3.91	5.30	20.00	0.7
Si	14	K-series	1.63	2.21	3.57	0.1
Cr	24	K-series	1.25	1.69	1.48	0.2
Total:			73.93	100.00	100.00	

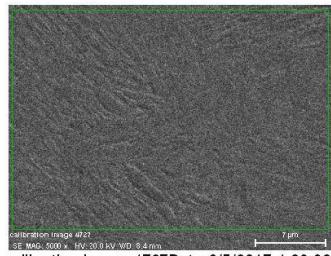
6/5/2017

4. Page

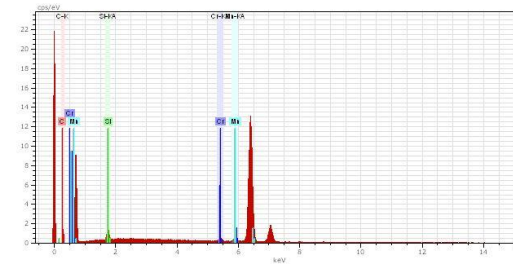


Laporan Pengujian SEM Baja 0.8CCrMn1.6Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam

6.2.2

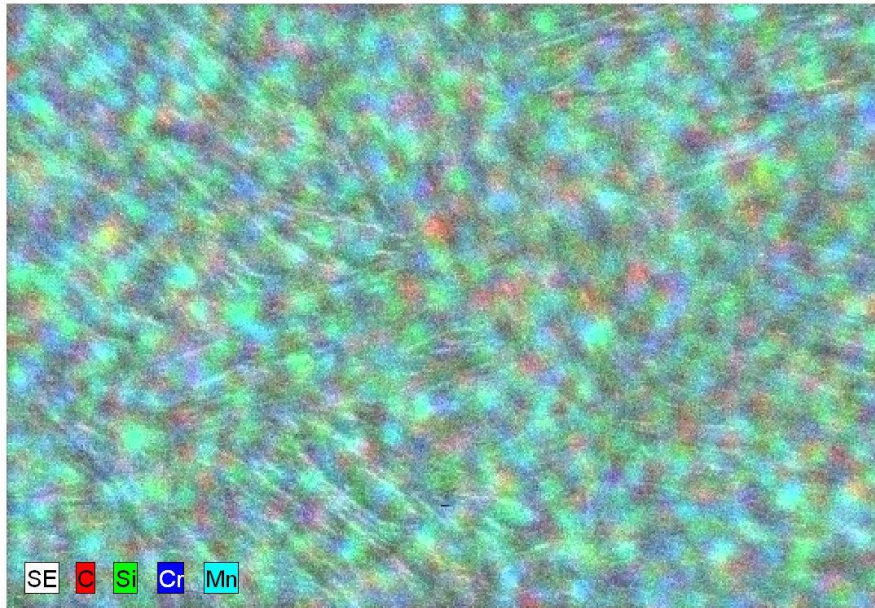


calibration image 4727 Date:6/5/2017 4:09:30
PMImage size:512 x
384Mag:5000xHV:20.0kV



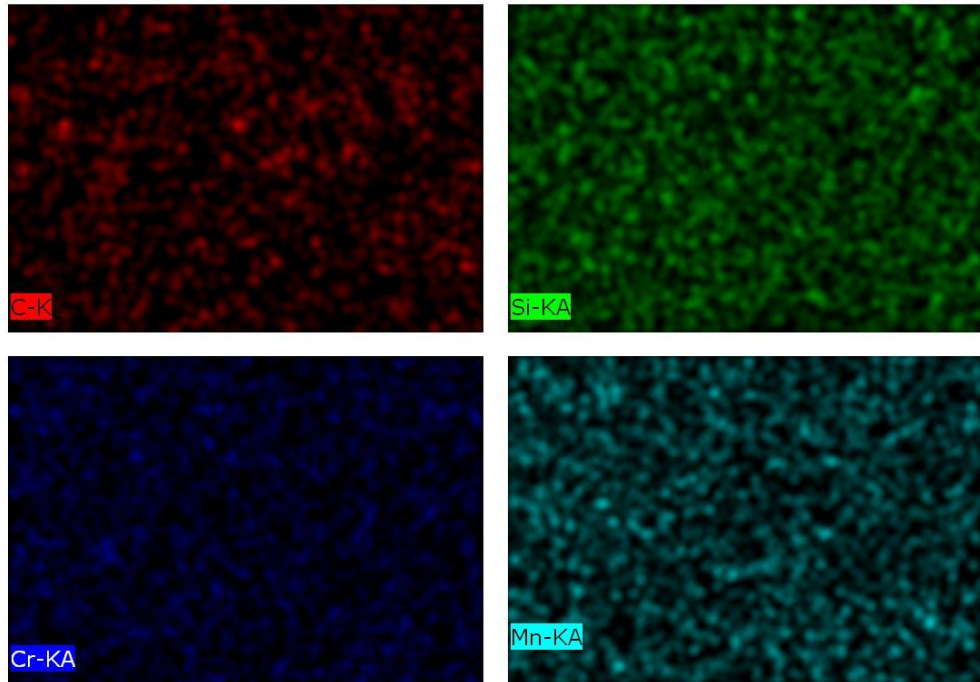
Map Date:6/5/2017 4:10:47 PM HV:20.0kV
Puls th.:5.98kcps

calibration image 21 3714 Date:6/5/2017 4:10:47 PMImage size:496 x
342Mag:5000xHV:20.0kV





Laporan Pengujian SEM Baja 0.8CCrMn1.6Si /Temperatur 200°C/Waktu 330 jam





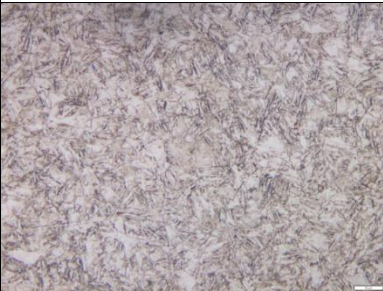
C-K, Si-KA, Cr-KA, Mn-KA Date: 6/5/2017 4:11:37 PM
Image size: 496 x 342
Mag: 5000x
HV: 20.0kV






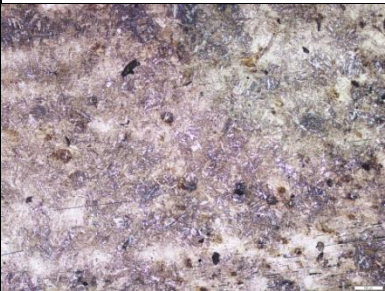
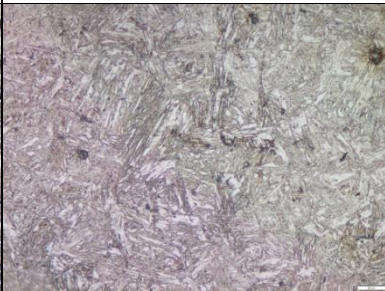
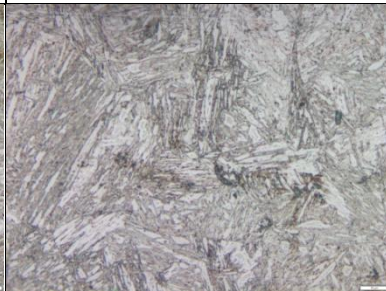
[Halaman ini sengaja dikosongkan]





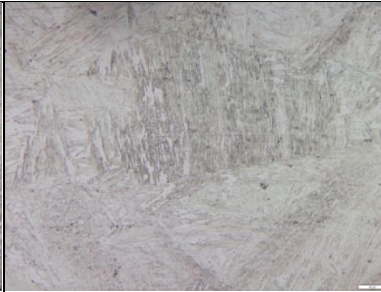



Hasil Observasi Strukturmikro

Baja	Perlakuan		Hasil Observasi Strukturmikro		
	austempering		Pembesaran (100X)	Pembesaran (500X)	Pembesaran (1000X)
	Temperatur (°C)	Waktu (Jam)			
<i>Hardox</i>	-	-			

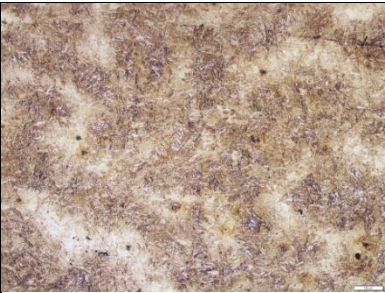
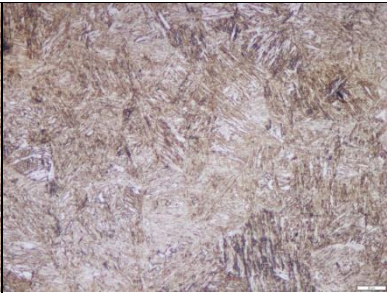
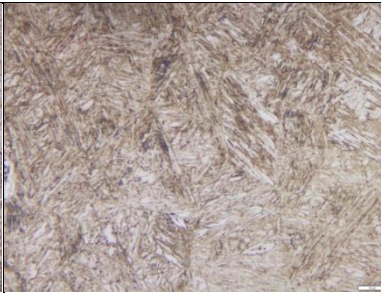
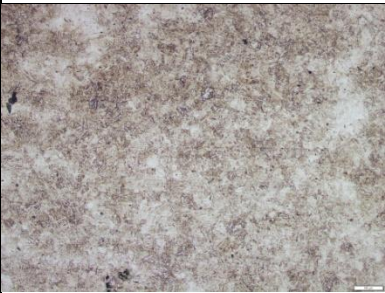
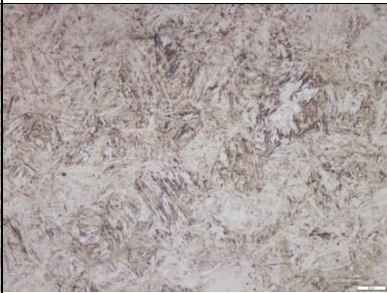
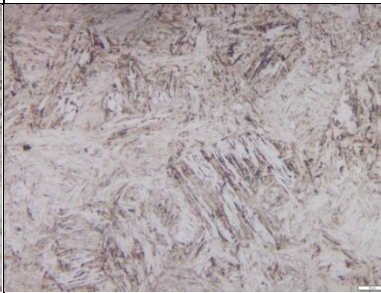


<i>Durostat</i>	-	-			
0.6CCrMn2Si	Quenching				

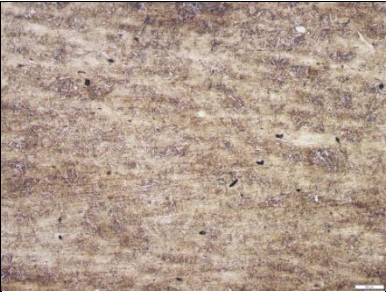
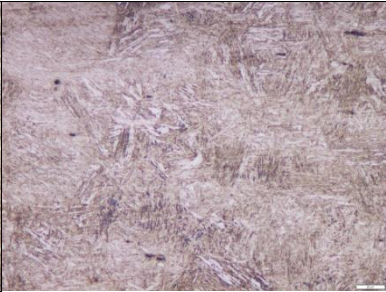
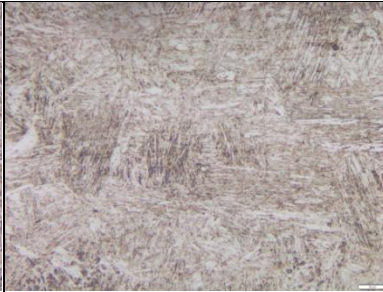

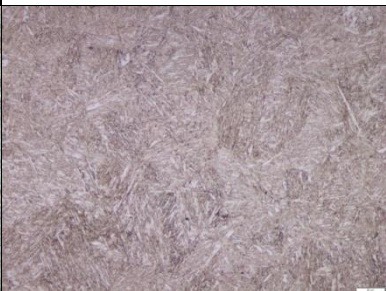
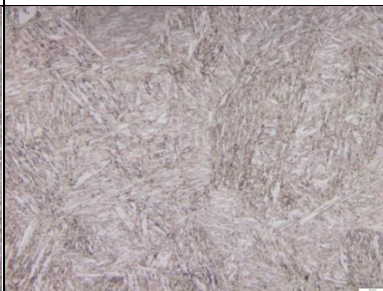


	Normalizing			
	Annealing			



	150	160			
		330			




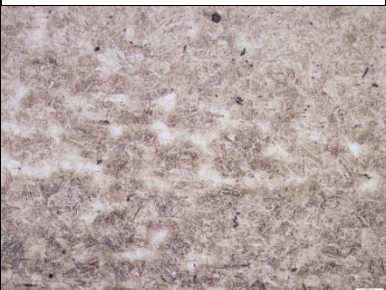
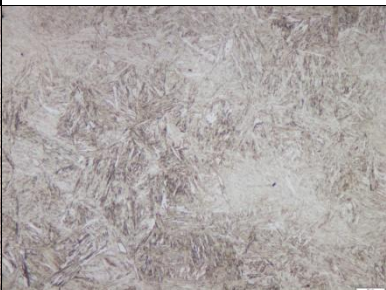
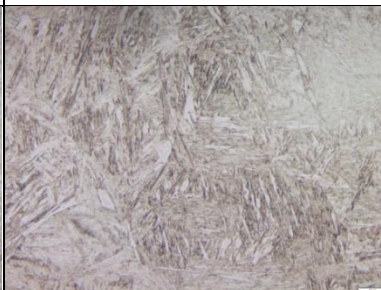


	200	160			
		330			


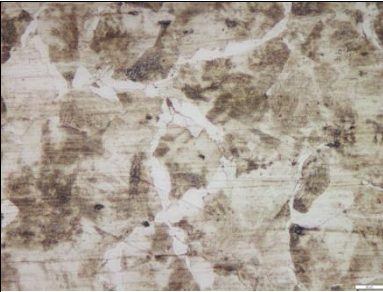

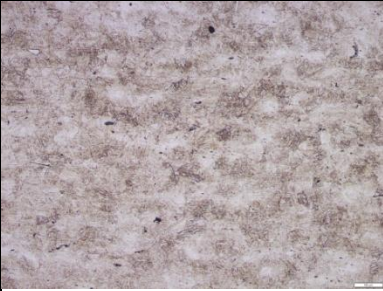
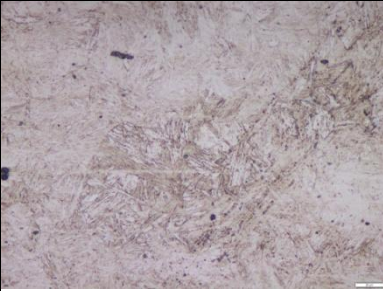
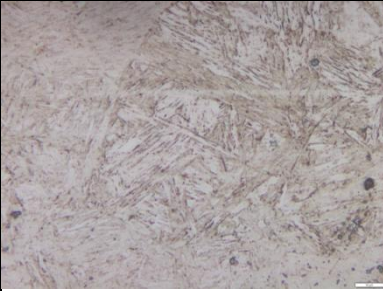


	250	160			
		330			

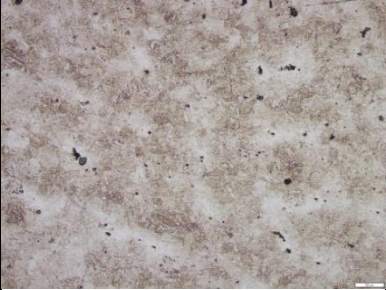
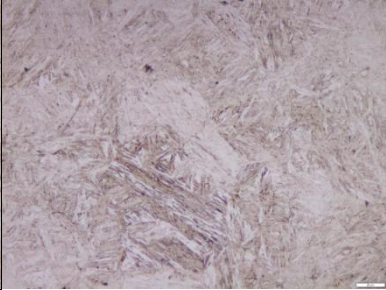
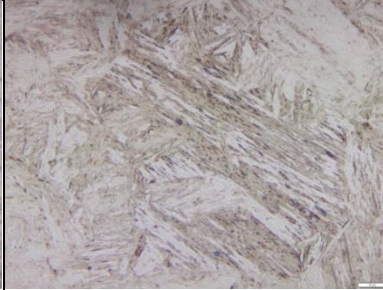
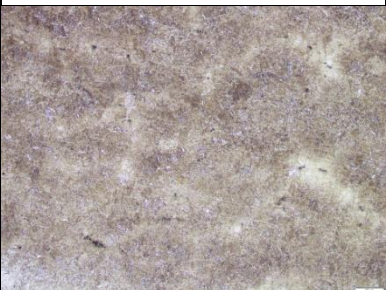




0.8CCrMn1.6Si	Quenching			
	Normalizing			




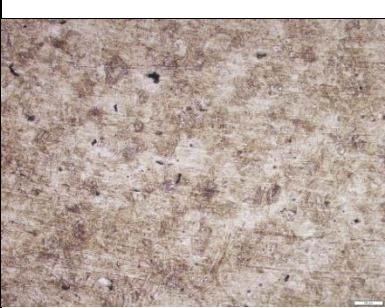




	Annealing				
	150	160			




		330			
	200	160			



		330			
	250	160			



		330			
--	--	-----	--	--	---



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BIOGRAFI PENULIS



Faisal Manta, Dilahirkan di kota Balikpapan-Kalimantan Timur pada tanggal 15 Juni 1986. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Abdul Azis Adam dan Ibu Sulastri. Penulis memulai pendidikannya di SD Patra Dharma 2 Balikpapan pada tahun 1991-1997, SMP Negeri 3 Balikpapan pada tahun 1997-2000, dan SMU Negeri 2 Balikpapan pada tahun 2001-2004. Pada tahun yang 2004, penulis melanjutkan pendidikan Diploma di Universitas Gadjah Mada DIY jurusan Teknik Mesin program studi Manufaktur. Pada tahun 2008, Penulis melanjutkan pendidikan Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Mesin program studi Manufaktur. Pada tahun 2013, Penulis melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Mesin program studi Rekayasa Sistem Manufaktur. Pada pelaksanaan tesis, penulis melakukan penelitian yang berjudul “Proses Austempering Pada Pembuatan Baja Tahan Aus Berstruktur Bainit”.